



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ BIOMASY

ENERGY USE OF BIOMASS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ladislav Mandelík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Ladislav Mandelík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Energetické využití biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student v rámci tématu provede rešerši způsobů využití biomasy pro získání tepla a elektrické energie.

Cíle bakalářské práce:

- 1/ rešerše druhů biomasy
- 2/ přehled technologií pro energetické zpracování biomasy za účelem výroby elektrické energie a tepla
- 3/ zmapujte, popište a porovnejte současné využívání biomasy v energetických celcích s kombinovanou výrobou

Seznam literatury:

Quaschninh Volker: Obnovitelné zdroje energií. Praha, Grada 2010, ISBN: 978-80-247-3250-3

Jandačka, J., Mikulík, M.: Technologie pre zvyšovanie energetickeho potencialu biomasy. TU Žilina 2007, ISBN 978-80-969595-4-9

Jandačka, J. a kol.: Biomasa ako zdroj energie. Žilina 2008, ISBN 978-80-969161-3-9

Malaťák, J., Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie. ČZU v Praze, 2008, ISBN 978-80-213-1810-6

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Hlavním cílem této bakalářské práce je rešerše druhů biomasy, přehled technologií pro její energetické zpracování za účelem výroby elektrické energie a tepla a porovnání současného využívání biomasy v energetických celcích s kombinovanou výrobou v České republice. První část práce se zaměřuje na definici biomasy, její rozdělení a na její charakteristické vlastnosti. Poté následuje souhrn technologií pro energetické zpracování biomasy. Další část práce se věnuje podílu jednotlivých kategorií biomasy na výrobě elektřiny a tepla. V závěru práce jsou popsány energetické celky v České republice využívající biomasu s kombinovanou výrobou tepla a elektřiny.

Klíčová slova

Biomasa, spalování, zplyňování, pyrolýza, fermentace, bioplyn, RC, ORC

ABSTRACT

The main purpose of this bachelor thesis is the research of different types of biomass, the survey of the technologies for electric power and heat production and the comparison of the present use of biomass in the Czech Republic. The thesis is concerned on the biomass definition, its parts and attributes. Then the technologies for energy use of biomass and biomass categories are mentioned. The last part of the thesis is devoted to the large power plant units in the Czech Republic using biomass and combined production of heat and electricity.

Key words

Biomass, combustion, gasification, pyrolysis, fermentation, biogas, RC, ORC

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MANDELÍK, L. *Energetické využití biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

.....
Datum

.....
Ladislav Mandelík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za cenné připomínky při vypracování této bakalářské práce.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	BIOMASA	12
2.1	Biomasa jako obnovitelný zdroj energie	12
2.2	Definice biomasy	12
2.3	Vznik rostlinné biomasy	12
2.4	Rozdělení biomasy	13
2.4.1	Biomasa cíleně pěstovaná	14
2.5	Vlastnosti biomasy	15
2.5.1	Spalné teplo a výhřevnost	15
2.5.2	Vlhkost	16
2.5.3	Obsah popela	17
2.5.4	Chemické složení hořlaviny	17
3	ENERGETICKÉ ZPRACOVÁNÍ BIOMASY	19
3.1	Spalování	19
3.1.1	Spalování na roštu	19
3.1.2	Spalování se spodním přívodem paliva.....	21
3.1.3	Speciální hořáky, hořákové provedení ohniště	21
3.1.5	Spalování na fluidní vrstvě.....	23
3.2	Zplyňování.....	23
3.2.1	Druhy zplyňovacích reaktorů	25
3.3	Pyrolýza	26
3.4	Anaerobní fermentace.....	27
3.4.1	Průběh anaerobní fermentace	27
3.4.2	Kategorizace BPS.....	28
3.4.3	Rozdělení technologií BPS podle sušiny substrátu	28
3.4.4	Možnosti využití produktů anaerobní fermentace.....	29
3.5	Transformace tepelné energie z biomasy	30
3.5.1	Rankin-Clausiův cyklus	30
3.5.2	Organický Rankinův cyklus	31
3.5.3	Ottův oběh.....	31
4	PRODUKCE ELEKTRINY A TEPLA Z BIOMASY V ČR	33
4.1	Podíl biomasy a bioplynu na výrobě elektrické a tepelné energie v roce 2015.....	33
4.1.1	Výroba elektřiny brutto	33
4.1.2	Výroba tepla brutto.....	35
4.2	Podíl biomasy a bioplynu na výrobě tepelné a elektrické energie v roce 2014.....	36
4.2.1	Výroba elektřiny brutto	36

4.2.2	Výroba tepla brutto.....	37
5	VYBRANÉ ENERGETICKÉ CELKY ČR	39
5.1	Plzeňská teplárenská a.s.	39
5.2	Teplárna Frýdek-Místek	40
5.3	Teplárna Trhové Sviny	41
5.4	Třebíč - Teplárna Sever	42
5.5	BPS Kouty	43
5.6	BPS Žďár nad Sázavou.....	44
6	ZÁVĚR.....	45
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	51

1 ÚVOD

Biomasa je v dnešní době stále častěji zmiňovaným pojmem, ať už v souvislosti s úbytkem fosilních paliv, nebo s globálním oteplováním. Biomasa je totiž jedním z obnovitelných zdrojů, které jsou ze své podstaty nevyčerpatelnými zdroji energie. Lidstvo proto hledá nové způsoby, jak tyto zdroje využít pro vlastní potřebu. Tento trend neminul ani Českou republiku. Využívání biomasy zažilo v posledních velký rozmach, ke kterému pomohlo i zavedení dotací na produkci energie z obnovitelných zdrojů. Kromě nevyčerpanosti při racionálním používání má biomasa oproti fosilním palivům další výhody. Spalováním biomasy sice také vzniká skleníkový plyn CO_2 , ale pouze v takovém množství, jaké bylo spotřebováno při fotosyntéze.

Technologie zpracování biomasy se stále vyvíjí ve snaze o co nejekologičtějšího přeměnu na energii. Tato práce má za cíl seznámit s danými metodami a nastínit aktuální postavení biomasy mezi dalšími zdroji energií v České republice.

2 BIOMASA

2.1 Biomasa jako obnovitelný zdroj energie

Energetickým fenoménem současné doby je soubor problémů, souvisejících s rostoucí spotřebou energie, zjevnou vyčerpatelností jejich tradičních zdrojů a stále rostoucí environmentálních nároků. Ložiska fosilních zdrojů energie, jako ropa, zemní plyn nebo uhlí, jsou omezená. Mohou být v průběhu několika desetiletí vytěžena a pak nenávratně zmizí. V důsledku toho obnovitelné zdroje energie hrají stále důležitější roli v energetické politice vyspělých států. Obnovitelnými zdroji energie lze částečně nahradit fosilní paliva a tím snížit emise skleníkových plynů. Biomasa je z hlediska potenciálu pro Českou republiku jedním z nejperspektivnějších z obnovitelných zdrojů energie a to jak pro výrobu tepla, tak i pro výrobu elektřiny. Její využití je technicky zvládnuto a není spojeno s problémy s nestabilitou dodávek přírodního charakteru, jako je tomu u jiných typů energií (vodní, sluneční, větrné). [1], [2], [3]

Použití biomasy má řadu výhod. Jak už bylo řečeno, jedná se o obnovitelný zdroj – tzn. při racionálním využívání nevyčerpatelný. Zásoby fosilních paliv a uranu se pohybují v desítkách let, kromě uhlí, které se odhaduje na 150 – 200 let. Biomasa se považuje za neutrální palivo, CO₂ (skleníkový plyn) se sice při spalování uvolňuje, ale přibližně stejné množství CO₂ je fotosyntézou při růstu biomasy z atmosféry spotřebováno. Prakticky zanedbatelný nebo jen malý je obsah síry, její stopy jsou ve slámě asi 0,1 %, a minimum popela. Biomasa může být transformována a skladována. Různé formy biomasy mohou být transformovány na odlišná pevná, plynná a kapalná biopaliva, která mohou být používána v energetických zdrojích i v dopravě, a současně mohou být skladována a používána v době potřeby. [4], [5]

Hlavním a zároveň obtížně překonatelným omezením pro využití biomasy je její množství na trhu a dopravní dostupnost. [3]

2.2 Definice biomasy

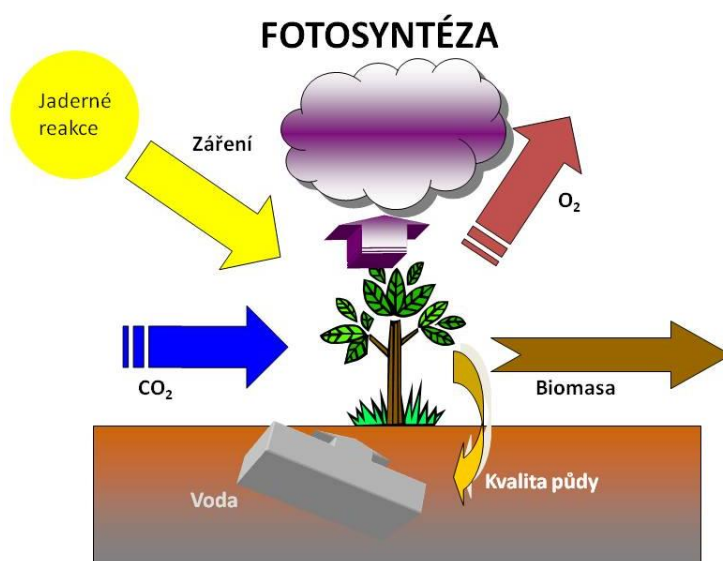
Obecně je biomasa definována jako substance organického původu (pěstování rostlin v půdě nebo vodě, chov živočichů, produkce organického původu, organické odpady). Biomasa je buď záměrně získávána jako výsledek výrobní činnosti, nebo se jedná o využití odpadů ze zemědělské, potravinářské a lesní výroby, z péče a údržby krajiny a podobně. [5]

Biomasa je v souvislosti s energetikou definována jako organická hmota rostlinného nebo živočišného původu, která je biologicky rozložitelná a může být využita pro spalování či jiné přeměny s následným energetickým využitím. [6]

2.3 Vznik rostlinné biomasy

Rostliny odebírají z atmosféry oxid uhličitý a v procesu zvaném fotosyntéza jej pomocí barviva chlorofylu a energie slunečního záření redukují a vytvářejí z něj glukózu a řadu složitých organických sloučenin, které potřebují. Jako odpadní produkt přitom vypouštějí do atmosféry kyslík. V rostlinách se za pomoci fotosyntézy ukládá část sluneční energie dopadající na Zemi. Tu následně využijeme buď energetickým využitím rostlin nebo zbytků z živočišné výroby, kde byly rostliny zpracovány. I když je mechanismus fotosyntézy složitější, je možné tuto biochemickou reakci znázornit následovně [7], [8], [9]:





Obrázek 1. Schéma fotosyntézy [10]

2.4 Rozdělení biomasy

Biomasu z hlediska původu dělíme na [11]:

- rostlinnou biomasu, kterou můžeme dále dělit na:
 - dendromasu – dřevní biomasu
 - fytomasu – jednoroční rostliny
- živočišnou biomasu – zoomasu
- komunální a průmyslové odpady

Podle zdroje vzniku biomasy můžeme biomasu rozdělit na [11]:

- lesní biomasu – palivové dřevo, větve, pařezy, kořeny, kůra, piliny
- polnohospodářskou biomasu
 - fytomasu – např. obilná sláma, obilí, konopí, atd.
 - živočišnou biomasu – (zoomasu) – např. exkrementy, odpady
- průmyslové a komunální odpady

Z hlediska energetického využití se biomasa dělí na [11]:

- biomasa odpadní
 - dřevo a dřevní odpad z lesního hospodářství (palivové dřevo, kůra, větve, šišky, pařezy, atd.) a dřevozpracujícího průmyslu (odřezky, hobliny, piliny)
 - rostlinné odpady z polnohospodářské prvovýroby a údržby krajiny (kukuřičná a obilná sláma, řepková sláma, zbytky po likvidaci keřů, seno, zbytky z vinic a sadů, atd.)
 - odpady ze živočišné výroby (exkrementy z chovu hospodářských zvířat, zbytky krmiv atd.)
 - komunální organické odpady (kaly z odpadových vod, organický podíl z tuhých komunálních odpadů atd.)

- organické odpady z potravinářských výroben (odpady z mlékárny, masokombinátů, lihovarů a konzerváren)
- biomasa záměrně pěstovaná pro tento účel [11]:
 - rychlerostoucí dřeviny (topol, vrba, olše)
 - energetické rostliny s vysokým obsahem cukru na výrobu alkoholu (cukrová řepa, brambory, obilí, atd.) a bionafta (řepka olejná)

2.4.1 Biomasa cíleně pěstovaná

Zdrojem biomasy jsou v současnosti především zbytkové nebo odpadní hmoty, např. sláma obilnin, dřevní štěpka či zbytky z dřevozpracujícího průmyslu. S předpokládaným vývojem ve využívání biomasy potenciál zbytkové a odpadní biomasy není zcela dostačující. Proto je nutné, aby byl v budoucnu zajištěn dostatek biomasy prostřednictvím cíleně pěstovaných energetických plodin. [3]

2.4.1.1 Rychlerostoucí dřeviny

Rychlerostoucí dřeviny (RRD) jsou dřeviny s krátkou dobou růstu a hmotnostním přírůstkem výrazně převyšujícím průměrný hmotnostní přírůstek ostatních dřevin. Jedná se především o topol, vrbu, jasan, olši, lísku a jeřáb. Výsadba RRD určených na energetické využití je jednou z možností využití málo produktivních polnohospodářských ploch, resp. jiných nezalesněných pozemků, na nepotravinářské účely. [2], [11]

RRD mají oproti lesům především tu výhodu, že doba mezi výsadbou a těžbou je podstatně kratší. Pohybuje se mezi 2 až 5 roky a výsadba se obnovuje po 20 až 30 letech. Produktem plantáží RRD je (dřevní) biomasa nejčastěji ve formě štěpky využitelná hlavně jako palivo (k vytápění, sdružené výrobě tepla a elektřiny). [5]

2.4.1.2 Energetické byliny

Energetické byliny jsou rostliny s nedřevnatým stonkem cíleně pěstované pro produkci energie. Dělíme je na jednoleté (triticale, konopí seté, amarant, kukuřice, pšenice, řepka olejka), víceleté a vytrvalé (šťovík krmný, mužák prorostlý) a energetické trávy (chrástice rákosovitá, ozdobnice čínská, křídlatka). [2], [12]

Jednoleté rostliny mají tu přednost, že jsou určeny pro rychlou produkci – jejich setí a sklizeň se provádí pomocí běžné zemědělské techniky. U většiny vytrvalých energetických plodin se prvním rokem musí vynaložit vyšší náklady při zakládání porostu, první sklizeň biomasy připadá v úvahu až druhým nebo třetím rokem. Po fázi rozrůstání však poskytnou vyšší a vyrovnanější výnosy i lepší energetickou efektivitu než rostliny jednoleté. [13]

Doba sklizně závisí na způsobu využití rostlin (bioplyn, spalování). Vhodná sklizeň rostlin určených na spalování je obvykle v zimě nebo brzy na jaře, kdy mají uschlé rostliny nejmenší vlhkost (kolem 15 – 22 %). Rostliny určené pro výrobu bioplynu je vhodné sklízet zelené s nízkým obsahem sušiny několikrát ročně. [3]

Energetické byliny mají často horší kvalitu pro spalování než dřevní hmota. Ve srovnání se dřevem bývá u bylin většinou vyšší obsah popela s horšími chemickými vlastnostmi. [14]

Při výběru rostlin pro masové pěstování pro energetické účely rozhoduje kromě agrotechnických hledisek především jejich vlastnosti, které příznivě ovlivní ekonomii energetického využití biomasy. Je to především výnos a výhřevnost rostliny, což lze souhrnně vyjádřit tzv. energetickým výnosem v [GJ/ha] a výsledné náklady na biomasu [Kč/t], popřípadě teplo obsažené v biomase [Kč/GJ]. [15]

2.5 Vlastnosti biomasy

Využití pevné biomasy jako paliva je určené jejími chemickými a fyzikálními vlastnostmi, které vyžadují speciální konstrukce kotlů, zejména co se týká velikosti, uspořádání a prostorového dimenzování topenišť, přívodů vzduchu apod. [11], [14]

2.5.1 Spalné teplo a výhřevnost

Z hlediska energetického využití biomasy jsou nejdůležitějšími vlastnostmi paliva výhřevnost a spalné teplo. [11]

Spalné teplo Q_S [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva za předpokladu, že se spaliny ochladí na 0°C a že veškerá pára vzniklá při spalování zkondenzuje. V mnoha případech se spalné teplo a výhřevnost vyjadřuje na základě jednotek $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Pro přepočty platí $1 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1} = 3,6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Spalné teplo je možné přesně určit měřením v kalorimetru. [11], [16], [17]

Výhřevnost Q_i [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$] je teplo uvolněné za stejných podmínek s tím rozdílem, že voda ve spalinách nekondenzuje a odchází jako vodní pára vzniklá odpařením vody z paliva. Hodnota výhřevnosti paliva je tedy nižší než spalné teplo o množství tepla potřebného k ohřátí a odpaření vody v palivu. [11], [17]

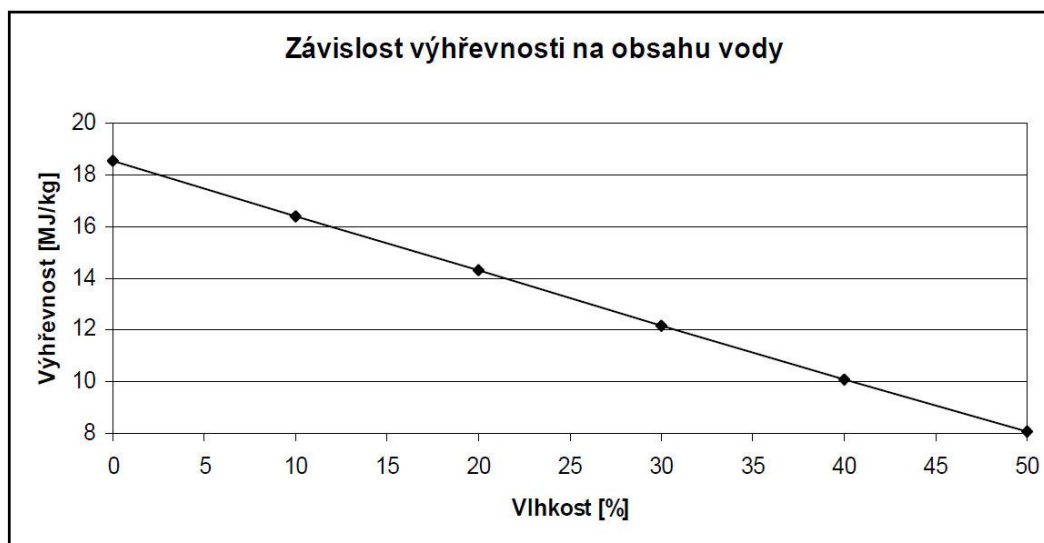
Výhřevnost se určí se vztahu [11]:

$$Q_i = Q_S - 2,453 \times (w + 9 \times H_2) \quad [\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}],$$

kde Q_i je výhřevnost paliva [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$], Q_S je spalné teplo paliva [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$], w je energetická (relativní) vlhkost paliva [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$] a H_2 je obsah vodíku v palivu [$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$].

V praxi se běžně počítá s výhřevností paliva, protože při spalování tuhých paliv v topeništi odchází odpařená voda se spalinami do komína o vyšší teplotě, než je rosný bod vodní páry, takže nedojde k její kondenzaci, odnáší tedy s sebou část tepla v podobě výparného tepla. Výhřevnost stejně jako spalné teplo lze stanovit výpočtem, přičemž se využívá znalosti prvkového složení paliva. [16], [17]

Výhřevnost biomasy se mění v závislosti na druhu použité biomasy a množství vlhkosti obsažené v palivu, jak je ukázáno na obrázku 2. Biomasa obsahující pryskyřice a oleje má výhřevnost vyšší. [18]



Obrázek 2. Graf závislosti výhřevnosti na vlhkosti biomasy [18]

2.5.2 Vlhkost

Typickou vlastností biomasy je vysoký a proměnný obsah vody (vlhkosti), který v tuhých palivech kolísá v širokém rozmezí od 0 % do 60 % a závisí především na tom, z jakých zdrojů biomasy získáváme. Palivo z dřevozpracujícího průmyslu se obvykle vyznačuje vyšší vlhkostí než palivo vzniklé zemědělskou činností. [15], [16], [18]

Vlhkostí dřeva rozumíme podíl obsahu vody v něm. Podíl ostatních složek dřeva označujeme souhrnným názvem sušina. V biomase je voda nežádoucí, proto je snahou získat palivo s co nejnižším obsahem vody, jinak spotřebuje při spalování velký podíl spalného tepla - snižuje se výhřevnost, což může způsobit nestabilitu spalování. Spalování vlhkého paliva snižuje účinnost kotle a může zkracovat jeho životnost. [18] [19]

Rozlišíme několik možností, jak může být voda ve dřevě vázána:

- **volná (kapilární) voda** – Při sušení dřeva se nejdříve vypařuje voda z cév a buněčných dutin, jedná se o takzvanou volnou (kapilární) vodu. Tato voda se vypařuje sama nebo ji lze ze dřeva odstranit mechanicky, například lisováním či odstředováním. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má podstatně menší význam než voda vázaná. [18], [20]
- **vázaná voda** – Mnohem obtížněji se ze dřeva vypařuje voda vázaná, která je uložena ve stěnách buněk a je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny OH amorfni části celulózy a hemicelulóz. Voda vázaná se v palivu vyskytuje při vlhkosti 0 – 30 %. Tuto vodu nelze ze dřeva odstranit mechanicky, ale lze to za pomoci tepla. Voda vázaná je někdy nazývána vodou hygroskopickou. Vyplývá to z vlastnosti, že vodu vázanou může dřevo přijmout i ve formě vodní páry. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam. [18], [20]
- **chemicky vázaná voda** – Z biomasy ji lze odstranit pouze spálením, proto se objevuje i při nulové absolutní vlhkosti. Zjišťuje se při chemických analýzách paliva a její celkové množství představuje 1 – 2 % sušiny. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má podstatně menší význam než voda vázaná. [18], [20]

Při stanovení obsahu vody v palivu je potřebné rozlišovat, zda se jedná o vyjádření obsahu vody na základě zvyklostí dřevozpracujícího průmyslu nebo na základě energetického vyjádření obsahu vody. [11]

V dřevozpracujícím průmyslu se obsah vody v dřevní hmotě vyjadřuje na základě absolutní vlhkosti [11]:

$$w_{dr} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 = \frac{\Delta m}{m_2} \times 100 [\%],$$

kde m_1 je hmotnost vzorku surové dřevní hmoty [kg], m_2 je hmotnost vzorku po vysušení [kg], Δm je úbytek hmotnosti vzorku vlivem vysušení [kg].

V energetice se vyjadřuje obsah vody na základě relativní vlhkosti [11]:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 = \frac{\Delta m}{m_1} \times 100 [\%]$$

2.5.3 Obsah popela

Každé palivo je složeno ze tří základních složek. Jednak je to voda, dále je to popel (tzv. nespalitelný podíl) a poslední složkou je hořlavina (tzv. spalitelný podíl). Obsah popela v palivech z biomasy je poměrně nízký, průměrně se pohybuje v rozmezí 1 – 6 %. Dřevo obvykle obsahuje relativně nižší množství popela (0,3 – 1 %), zatímco výrazně vyšší hodnoty nalézáme v kůře (3 – 4 %), slámě (5 %) nebo trávách (7 %). Pro srovnání, množství popela v černém uhlí se pohybuje mezi 10 – 13 %. Popel stejně jako voda je nežádoucí složkou paliva, jak z hlediska výhřevnosti, tak z hlediska chování paliva. [12], [18], [21]

Důležitým parametrem je teplota tavení popela. Je-li teplota tavení popele nižší než teplota plamene při hoření, pak dochází k zalepování roštu ohniště. Tento nežádoucí jev způsobuje značné problémy při samotném spalování. Zalepením pohyblivých roštů, popřípadě šamotové vyzdívky, se velmi razantním způsobem snižuje funkčnost kotle. Palivo dokonale neprohoří, čímž se nejen snižuje účinnost kotle, ale roste i obsah škodlivých látek v odcházejících spalínách. Nánosy popelovin na stěnách topeniště difundují do vyzdívky, která se následně po tenkých vrstvách odlupuje. Problémem rostlinných popelovin jsou volné oxidy (SiO_2 , CaO , Na_2O , K_2O) a chloridy, které výrazně snižují body tání. Proto se tomuto problému musí předcházet takovým způsobem, aby teplota na roštu byla nižší, než je teplota tavení spalované biomasy. [18], [22]

2.5.4 Chemické složení hořlaviny

Hořlavinu tvoří ta část paliva, z které se uvolňuje teplo, tj. chemicky vázaná energie v palivě. Pro spalování biomasy je typické hoření tzv. dlouhým plamenem. Biopaliva totiž obsahují velký podíl plynných látek uvolňovaných pyrolýzou a nehořících na roštu, ale v prostorách nad roštem. Tyto hořlaviny pak obvykle dohořívají ve speciální dohořívací komoře. Biomasu lze spalovat v klasických zdrojích, ale účinnost spalování je velmi nízká a zároveň při tomto spalování vznikají vysoké emise. [11], [18]

Hořlavina je tvořena 5 prvky reagujícími s kyslíkem, a to uhlíkem C, vodíkem H_2 , sírou S, dusíkem N_2 a palivovým kyslíkem O_2 . Do podílu hořlaviny se počítá jen síra spalitelná, označovaná jako síra prchavá, nikoli síra nespalitelná, tzv. síra síranová. [17]

Uhlík je nositelem tepelné energie. V palivu je obsažen ve formě organických sloučenin (uhlovodíků). Při dokonalém spalování vytváří CO_2 , v případě nedostatku oksyličovadla se tvoří CO. [17]

Vodík při hoření vyvine 4krát více tepla na jednotku hmotnosti než uhlík, což se příznivě projeví na výhřevnosti paliva. Celkový vodík paliva se skládá z vodíku vázaného a vodíku nezadaného. Vodík vázaný je ta část vodíku, která je vázaná na kyslík. Tento vodík potřebuje určité množství tepla na odpaření vody. Vodík nezadaný je ta část vodíku, která zbude po sloučení s celým obsahem kyslíku v palivu. [16]

Síra je v palivu nežádoucí, přestože zvyšuje výhřevnost. Produkty hoření síry mají nepříznivý vliv na trvanlivost spalovacího zařízení a znečišťují okolní atmosféru. Jednou z velkých předností biomasy je, že obsahuje pouze minimální množství nebo žádné množství síry, a tak během spalování nedochází ke vzniku škodlivých sloučenin s jejím obsahem. [16], [18]

Kyslík je také nežádoucí součástí paliva, protože váže vodík a částečně i uhlík (vznikají hydroxidy, voda, oxidy). Velké procentní zastoupení v palivu mají fytopaliva. [17]

Dusík se nezúčastňuje reakcí hoření a zcela přechází do spalin. Svou přítomností snižuje obsah ostatních prvků, což se projevuje ve snížení výhřevnosti paliva. [17]

Nejpodstatnější chemické prvky přítomné v hořlavině jsou uvedeny v tabulce 1, procentuální hodnoty jsou pouze orientační. Veličina A^{daf} značí množství popela v palivu. [18]

Tabulka 1. Chemické složení hořlaviny [18]

Složka	Dřevo		Kůra
	Jehličnaté	Listnaté	
[%]			
C^{daf}	51,0	50,0	51,4
H^{daf}	6,2	6,2	6,1
O^{daf}	42,2	43,3	42,2
S^{daf}	0,02	0,02	0,05
N^{daf}	0,6	0,6	0,3
A^{daf}	1,0	1,0	2,3

3 ENERGETICKÉ ZPRACOVÁNÍ BIOMASY

Způsoby využití biomasy na energetické účely jsou do značné míry předurčené fyzikálními a chemickými vlastnostmi biomasy. [11]

Velmi důležitým parametrem biomasy je její vlhkost, resp. obsah sušiny v biomase. Jestliže je obsah sušiny v biomase do 50 %, biomasa se zpracovává mokkými procesy. V případě, že biomasa obsahuje více než 50 % sušiny, používají se na zpracování suché procesy. [11]

Rozdělení jednotlivých typů přeměn biomasy [23], [11]:

- termochemická přeměna (suché procesy) – spalování
 - zplyňování
 - pyrolýza
- biochemická přeměna (mokré procesy) – alkoholová fermentace
 - aerobní fermentace
 - anaerobní fermentace
- fyzikálně-chemická přeměna – esterifikace bioolejů

3.1 Spalování

Pro využití dřevní a bylinné biomasy do obsahu vlhkosti 50 % se nejčastěji volí přímé spalování. Technologie spalování je dokonale zpracovaná a pro investory představuje minimální riziko. Produktem je tepelná energie, která se následně využije pro vytápění, technologické procesy nebo pro výrobu elektrické energie. Dalšími produkty jsou spaliny a tuhý zbytek ve formě popela a popílku. Spalování většinou nevyžaduje předběžnou speciální úpravu biomasy. Vzhledem k charakteru biomasy a jejímu proměnnému složení je nutno věnovat značnou pozornost optimálním podmínkám při spalování a při čištění výstupních spalin, kde je nutno především kontrolovat emise oxidu uhelnatého a tuhých látek, v některých případech i emise oxidů dusíku a organických látek. [6], [9]

Technologie spalování využívá několik principů spalování [25]:

- spalování na roštu
- spalování se spodním přívodem paliva
- speciální hořáky, hořákové provedení ohniště
- spalování ve fluidní vrstvě

3.1.1 Spalování na roštu

Roštové kotle mají dlouhou historii. Uplatnily se při spalování fosilních paliv a nyní se uplatňují při využití biomasy ve všech jejích formách: kusové dřevo, štěpka, pelety, obiloviny či dřevní odpady aj. Roštové kotle slouží ke spalování paliv v pevné vrstvě. [24], [26]

Princip spalování na roštu vychází z funkce roštu [24]:

- zajištění přívodu spalovacího vzduchu do jednotlivých míst plochy roštu tak, aby spalování probíhalo při optimálním přebytku vzduchu

- možnost postupného vysoušení, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a dokonalé vyhoření paliva
- shromažďování tuhých zbytků po spalování, popřípadě jejich odvod z ohniště
- možnost měnit výkon zařízení

Základní části roštového ohniště jsou: spalovací prostor (vlastní ohniště) vymezený na bocích stěnami a přední a základní klenbou a na dně roštem, palivová násypka, popelník a zařízení pro přívod a regulaci spalovacího vzduchu. [27]

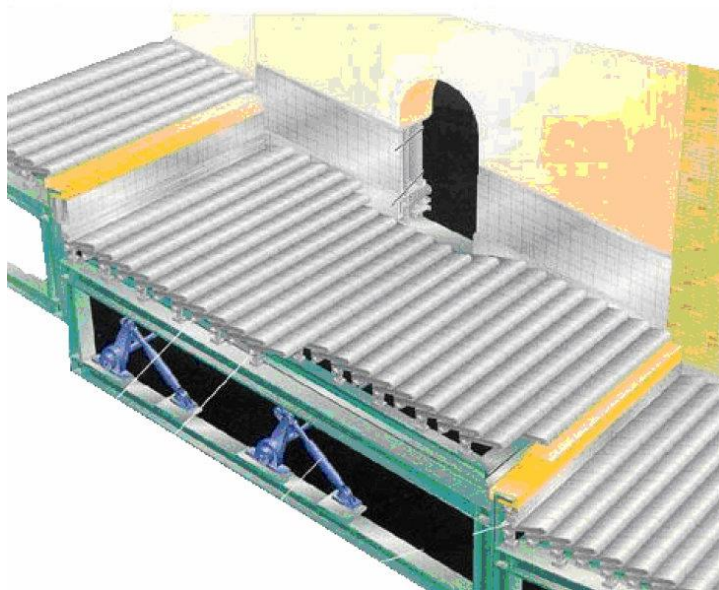
Palivo na roštu prochází těmito charakteristickými fázemi [26]:

- sušení – palivo se ohřívá na cca 120 °C a vypuzuje se z něho povrchová a hydrokopická voda
- odplyňování – uvolňování prchavé hořlaviny, které probíhá intenzivně po ohřátí nad 250 °C
- hoření prchavé hořlaviny a zápal tuhé hořlaviny
- dohořívání tuhé fáze a chladnutí tuhých zbytků

Spalování u roštových ohnišť probíhá ve vrstvě na roštu (tuhý uhlík), jednak v prostoru nad vrstvou paliva (uvolněná prchavá hořlavina) Podíl hoření nad vrstvou paliva je tím větší, čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny v palivu. [26]

Pokud budeme hovořit o malých výkonech, jedná se zpravidla o spalování na pevném roštu, který je nehybný a zbytky po palování přes něj propadávají do popelníku. Velikost roštu do jisté míry omezuje výkon zařízení. Pro usnadnění odvodu zbytků po spalování může mít rošt vibrační nebo pohyblivý mechanismus. [24]

Pokud hovoříme o větších výkonech, jedná se o rošty mechanické (obrázek 3), které jsou pohyblivé a zajišťují pohyb paliva směrem do míst, odkud jsou následně odváděny zbytky po spalování. Pro spalování biomasy se používá roštové ohniště s dvěma ohnisky hoření. Tato ohniště bývají seškracena, aby při delším plamenu bylo zajištěno promísení prchavé hořlaviny se vzduchem. Tomu se napomáhá přivedením sekundárního, případně terciálního vzduchu nad rošt. Jeho podíl je tím větší, čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny. [26], [24]



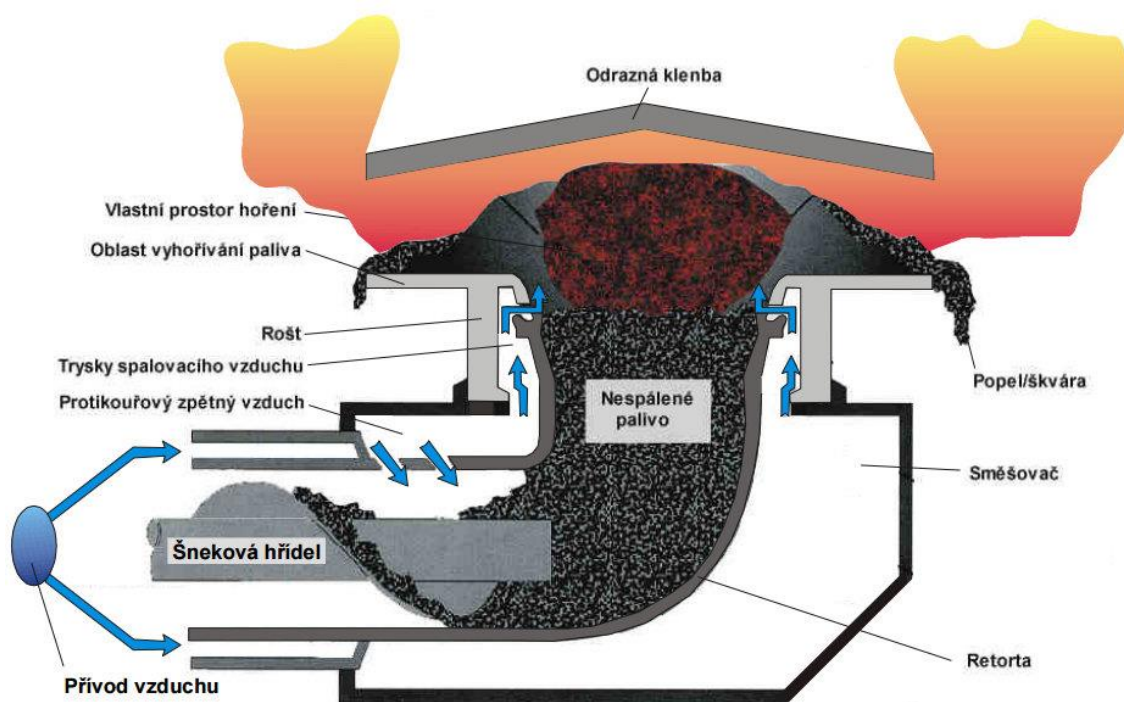
Obrázek 3. Posuvný rošt [27]

3.1.2 Spalování se spodním přívodem paliva

Kotle se spodním přívodem paliva jsou jedny z nejvíce rozšířených. Princip spočívá v přivádění paliva pod hořící vrstvu. U této koncepce je vhodné užití reflexního keramického tělesa, které odráží tepelné záření hořící vrstvy a plamene zpět do ohniště, a pomáhá tak při zapalování a stabilizaci hoření. [27]

Palivo je dopravováno šnekovým dopravníkem. Pomocí litinového kolena, retorty, je směr pohybu paliva převeden do vertikálního směru. Na retortu navazuje rošt, přičemž mezera mezi roštem a retortou dává prostor pro proudění spalovacího vzduchu. Rošt musí být z důvodu těsnosti umístěn ve směšovači. Palivo se již v retortě zahřívá a vyvyšuje, nad touto oblastí dochází k intenzivnímu uvolňování prchavé hořlaviny, která hoří výše. Fixní uhlík dohořívá na roštu. Dohořívající palivo a následně popel je novým palivem vytlačován na okraje roštu, kde přepadává do popelníku. [27]

Příkladem hořáku se spodním přívodem paliva je ohniště moderního kotle s (dis) kontinuálním přívodem paliva, jehož principiální schéma uvádí obrázek 4, který byl poprvé vyvinut firmou CRE v Anglii. [27]

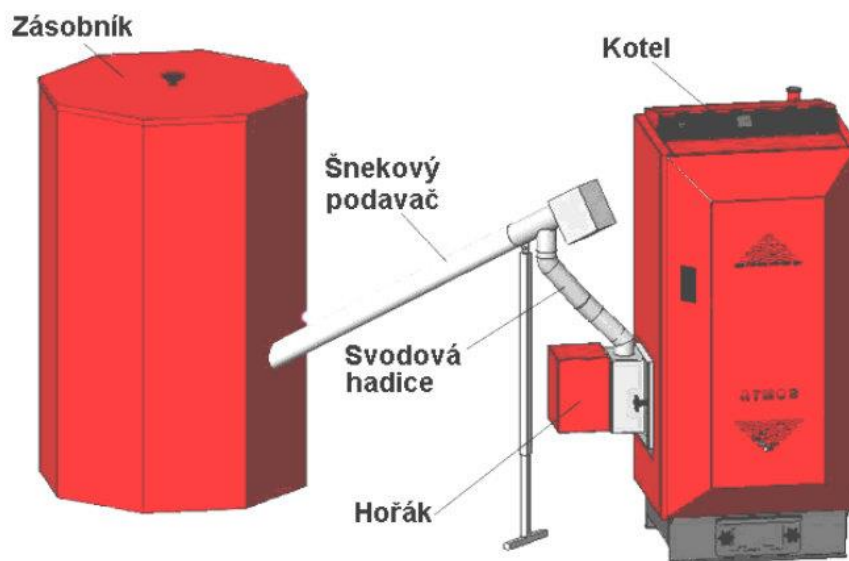


Obrázek 4 Schéma ohniště kotle CRE. [27]

3.1.3 Speciální hořáky, hořákové provedení ohniště

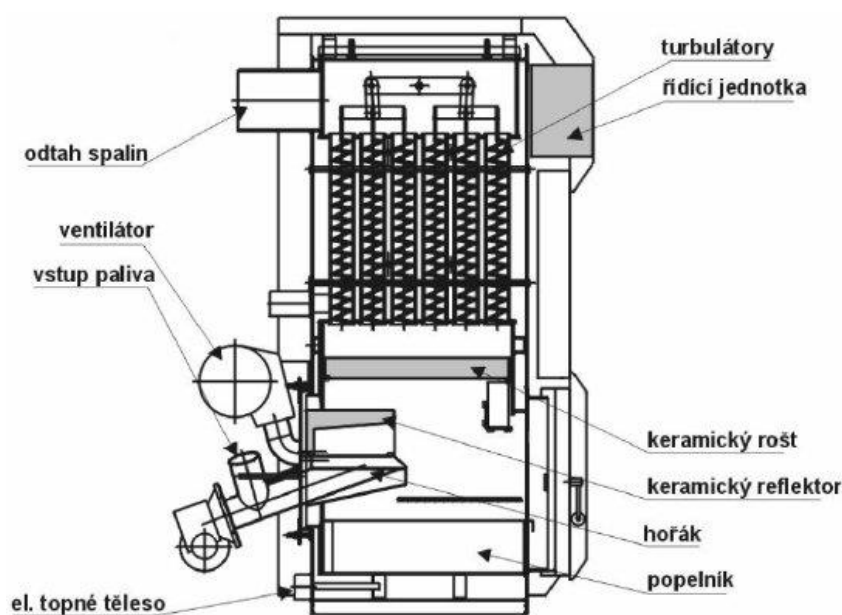
Hořáky na biomasu byly vyvinuty např. ve Švédsku a jsou s dobrými výsledky provozovány především na zemědělských farmách. Lze v nich používat jak suché obilí (nejlepší výsledky jsou dosahovány spalováním ovsa), tak biopelety. Při spalování se tvoří asi 7 % popela, a proto je vhodné jej aplikovat do kotlů s velkým popelníkovým prostorem nebo automatickým vynašečem popela. Příkladem použití hořáku je automatický kotel firmy Atmos se šnekovým podavačem a zásobníkem na pelety zobrazený na obrázku 5. Princip fungování hořáku je následující. Šnekový podavač podává palivo do hořáku přes svodovou hadici, která plní částečně i funkci mezizásobníku. Hořák má čidlo pro zjištění množství paliva v hořáku, a pokud signalizuje nedostatek paliva, podavač naplní hořák a část hadice. Hořáky jsou vybaveny žhavicí spirálou, která umožňuje automatické zapálení paliva. Po jednoduché demontáži hořáku lze kotel opět provozovat na kusové dřevo. Systémy s aplikacemi hořáků

do stávajících kotlů jsou velice rozšířeny ve skandinávských zemích. Podstatným prvkem, který hořáky odděluje od ostatních koncepcí je skutečnost, že palivo hoří přímo v části demontovaného hořáku. [24]



Obrázek 5. Schéma kotle Atmos s hořákem a se zásobníkem [24]

Jinou koncepcí je takové provedení spalovací komory, která hořák připomíná. Tato spalovací komora nemá rošt a je poměrně malých rozměrů. Přisun paliva a pohyb v hořáku je většinou horizontální. Koncepci takového kotle zachycuje obrázek 6. Palivo je dopravováno šnekovým dopravníkem do horizontálního hořáku. Hořák je shora ohraničen válcovým keramickým reflektorem. Popel je vytlačován novým palivem a přepadává přes okraj roštu do popelníku. Tato koncepce je vhodná pro kotle malého a středního výkonu, pro kotle větších výkonů je jednodušší použít odlišnou koncepci. [24]



Obrázek 6. Schéma kotle s hořákovým provedením [24]

3.1.5 Spalování na fluidní vrstvě

Kotle pracující na principu spalování paliva ve fluidní vrstvě byly vyvinuty pro spalování paliva širokého rozsahu. Fluidizace je obecně proces, při němž je soubor pevných látek udržován ve vznosu proudem tekutiny. Fluidní vrstva tvoří disperzní systém, který vytváří průtokem plynu vrstvou částic nasýpaných pod pórovité dno – tzv. fluidní rošt. Náplň fluidní vrstvy tvoří palivo, odsiřovací aditivum (většinou vápenec) a aditivum pro stabilitu vrstvy (inertní materiál – např. písek). [26]

U fluidní vrstvy dochází k hoření paliva v celém jeho objemu bez plamene, který je typický pro spalování paliva v topeništi roštového kotle. Spalované palivo plave ve fluidní vrstvě přičemž odhořelé palivo je z povrchu zdrcováno a jako úletové částice opouští fluidní vrstvu spolu se spalinami. Fluidní vrstva vytváří podmínky pro dokonalý styk paliva s kyslíkem. [28]

Výhody fluidního spalování [26]:

- Možnost dávkování vápence do kotle za účelem částečného odsíření spalin, účinnost odsíření je od 40 do 90 % podle typu kotle, kvality paliva s aditivem a množství dávkovaného vápence, fluidní kotle tedy nevyžadují budování odsiřovacího zařízení za kotlem.
- Nízké teploty ve fluidní vrstvě a odstupňovaný přívod vzduchu do ohniště mají příznivý dopad na redukci NO_x ve spalinách.
- Spalování ve fluidní vrstvě probíhá s vyšším zatížením roštové plochy oproti klasickým roštovým kotlům, a rozměry roštu jsou proto menší.
- Kotle mají nižší komínovou ztrátu, neboť odsířené spaliny na konci kotle mohou mít v důsledku nižšího rosného bodu nižší teplotu. Účinnost kotlů bývá při jmenovitých parametrech 92-94 %.

Nevýhodou fluidního spalování je zvýšená citlivost na granulometrii paliva. [26]

Rozlišujeme dva typy fluidních kotlů [29]:

- stacionární fluidní kotel
- fluidní kotel s cirkulační vrstvou

Stacionární fluidní kotle pracují při nižších rychlostech fluidizace a větší granulometrii. Mají jasně ohraničenou vrstvu. Využití je především při spalování méně jakostních paliv a biomasy. Obvyklé provedení je s ložovými hady (výparníkem) do fluidní vrstvy, což zajišťuje neškvárování. Průřez ohniště může být rovnoměrný nebo rozšiřující se s rostoucí výškou. [29]

Fluidní kotle s cirkulující vrstvou pracují při vyšších rychlostech fluidizace s nižší granulometrií. Mají silně expandovanou cirkulující vrstvu, která je v oblasti ohniště více koncentrovaná. Využití z hlediska paliv je širokopásmové. Obvyklé provozní řešení je na úrovni pod škvarováním popelovin. Průřez ohniště bývá zpravidla rozšiřující se s rostoucí výškou. Společným znakem kotlů bývají cyklóny, kde dochází k odloučení těžkých částic a návratu zpět do vrstvy, cirkulace se pohybuje mezi 10 až 15 cykly. [29]

3.2 Zplyňování

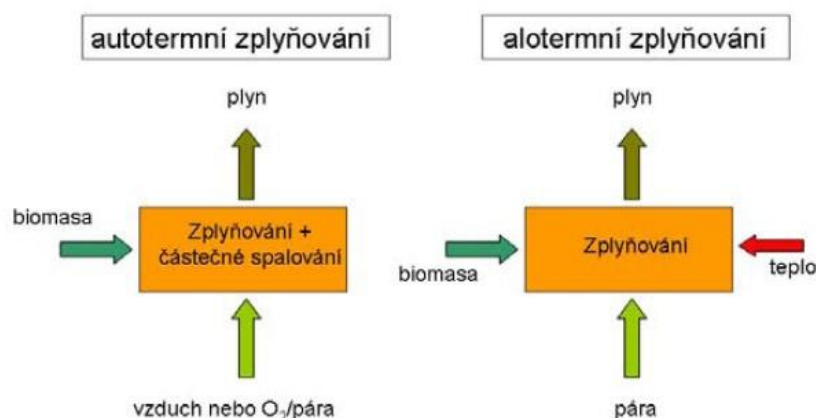
Zplyňování je termochemická přeměna pevného či kapalného paliva s cílem dosáhnout co největší konverze na výhřevný energetický plyn. Tato přeměna probíhá v důsledku působení vysoké teploty a zplyňovacího média, kterým je většinou vzduch, ale může jím být i pára,

čistý kyslík či oxid uhličitý. Produktem je plyn obsahující výhřevné složky (H_2 , CO , CH_4 a další minoritní sloučeniny), doprovodné složky (CO_2 , N_2) a znečišťující složky (dehet, prach a další). Jejich zastoupení záleží na použitém palivu, technologii a podmínkách procesu (zplyňovací poměr, teplota, tlak, materiál fluidního lože). [30]

Z chemického hlediska je proces zplyňování biomasy složitý a zahrnuje mnoho kroků, mezi ně patří [31]:

- tepelný rozklad paliva na plyn, kondenzující páry a dřevěné uhlí (sušení)
- následné tepelné štěpení par na plyn a pevný uhlík (pyrolýza)
- zplyňování pevného uhlíku vodní parou nebo oxidem uhličitým (redukce)
- částečná oxidace hořlavých plynů, vedlejších složek pevného uhlí (oxidace)

První tři procesy, tj. sušení, pyrolýza a redukce, jsou endotermní (spotřebovávají teplo). Potřebné teplo může být získáno přímo v reaktoru oxidací (hořením) části paliva, nebo může být přivedeno z okolního prostředí. Pokud je praktikován první způsob, tedy pokrytí spotřeby tepelné energie částečným spálením paliva přímo v reaktoru, používá se termín autotermní, neboli přímé zplyňování. Pokud je teplo přiváděno z okolí do reaktoru, hovoříme o tzv. alotermním, nebo nepřímém zplyňování. Na následujícím obrázku jsou tyto pojmy znázorněny schematicky. [32]



Obrázek 7. Autotermní a alotermní zplyňování [32]

Při autotermním zplyňování musí být do reaktoru přiváděn kyslík, aby docházelo k potřebným spalovacím exotermním reakcím, které pokrývají potřebu tepla pro zplyňování. Nejčastěji je používán vzdušný kyslík, což má ale za následek naředění produkovaného plynu dusíkem ze vzduchu a tedy i snížení obsahu výhřevných složek. Výhřevnost plynu se při autotermním zplyňování vzduchem pohybuje v rozmezí $2,5 - 8,0 \text{ MJ/m}^3$. Naředění generátorového plynu dusíkem při autotermním zplyňování se dá předejít použitím čistého kyslíku, což ale znamená i zvýšení investičních a provozních nákladů na jeho výrobu. Pro pokrytí tepelných nároků bývá v reaktoru spáleno přibližně 20 – 25 % hm paliva. [32]

Při alotermním (nepřímém) zplyňování je produkován plyn o vyšší výhřevnosti (až 14 MJ/m^3) a se širšími možnostmi využití. Nevýhodou je nutnost zajistit přísun tepla, což vyžaduje složitější zařízení s vyššími investičními náklady. Zplyňovacím médiem při alotermním zplyňování bývá vodní pára. Prísun tepla pro alotermní zplyňování bývá zajištěn přehřevem zplyňovacího média a paliva, otopem stěn reaktoru nebo přenosem tepla inertním materiálem (např. pískem) přímo do reaktoru [32]

Výhody zplyňování proti přímému spalování za účelem výroby tepla a elektrické energie (při kogeneraci) jsou následující [32]:

- dosažení větší konverze paliva na elektrickou energii (vyšší teplotní modul)
- úspora primárních paliv na jednotku výkonu
- nižší měrné provozní náklady na jednotku výkonu
- zmenšení technologického zařízení na jednotku výkonu
- převedení tuhého paliva s velkým měrným objemem na plynné palivo
- snadnější odstraňování hlavních škodlivin v plynné fázi
- při spalování čistých plyných paliv s dostatkem vzduchu nevznikají tuhé emise
- možnost dosažení vyšších teplot spalováním plyných paliv
- rovnoměrný ohřev velkých ploch plynými palivy
- lepší regulace při spalování plyných paliv
- plyná paliva se dají přímo spalovat v tepelných strojích
- možnost využít různá alternativní paliva (RDF, REF, BRKO, OP apod.)
- snížení produkce CO₂, SO₂, NO_x a POP apod. na jednotku výkonu

Nevýhodou zplyňování je však nutnost čistit generátorový plyn, hlavně od dehtů, a vyšší investiční náklady, jejichž význam s ohledem na současnou dotační politiku EU je ale znatelně nižší.

V současnosti převažující aplikací vyrobeného plynu je jeho spálení v plynovém motoru (v kogenerační jednotce). Řádově náročnější na obsah dehtů v plynu je plynová turbína. Plyn ze zplyňování může být využit také jako surovina pro výrobu různých produktů, např. H₂, CO, hnojiv a dalších chemikálií. [30]

3.2.1 Druhy zplyňovacích reaktorů

Existuje několik druhů zplyňovačů, které se dělí podle stavu zplyňovacího materiálu, případně podle proudů pevného materiálu a proudů zplyňovacího média [33]:

Zplyňovače s pevným ložem:

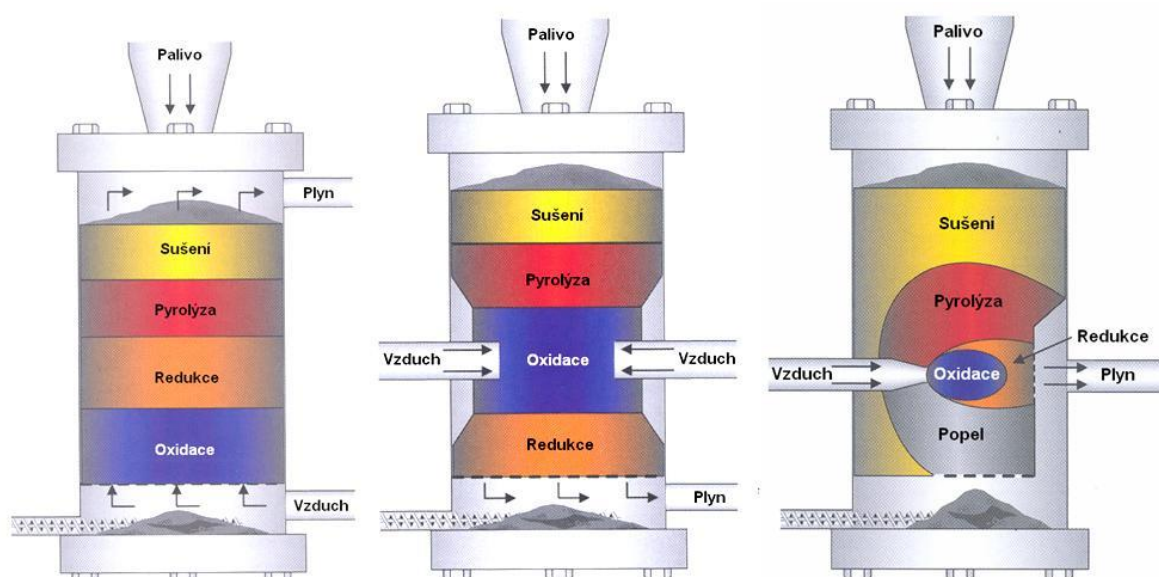
- protiproudý zplyňovač - nejjednodušší typ zplyňovače
- souproudý zplyňovač – méně dehtů oproti protiproudému
- souproudý zplyňovač s otevřeným jádrem – pro jemnou biomasu
- vícestupňový souproudý zplyňovač - spalování, zplyňování a pyrolýza odděleny
- zplyňovač s křížovým tokem - je původně navržen pro zplyňování dřevěného uhlí

Protiproudá zplyňovací jednotka (viz obrázek 8) má jasně definované zóny pro částečné spalování, redukci a pyrolýzu. Vzduch je přiváděn spodem a působí na tok paliva jako protiproud. Plyn je odváděn z vyššího místa. Protiproudé zplyňovací jednotky dosahují nejvyšší účinnosti ve chvíli, kdy horký plyn stoupá spodním ložem paliva a udržuje zplyňovací jednotky na nízké teplotě. Značné teplo, vyvinuté plynem, se používá k přehřevu a sušení paliva. Uvedené zplyňovací jednotky jsou nejvhodnější pro aplikace, kde je přípustné malé množství prachu ve spalínách a kde je vyžadována vyšší teplota plamene. [34]

Souproudá zplyňovací jednotka (viz obrázek 8) má vzduch přiváděn do sestupného

pevného lože, anebo jsou pevná paliva a plyn odváděny dnem. Omezením u souprroudých zplyňovacích jednotek je jejich nižší celková účinnost a problémy s vyšší vlhkostí. Doba (5 – 10 minut) potřebná k zapálení a uvedení zařízení do pracovní teploty s dobrou kvalitou plynu je kratší než u protiproudého generátoru plynu. Tyto zplyňovací jednotky jsou nejvhodnější pro ty aplikace, kde je potřeba čistý topný plyn a tam, kde je důležitá regulace teploty. Tyto zplyňovací jednotky můžete použít v aplikacích, vyžadujících mírné teploty do hodnoty 600 °C. [34]

Zplyňovací jednotka s křížovým tokem (viz obrázek 8) byl navržen pro zplyňování dřevěného uhlí. Proces zplyňování se vyznačuje vysokými teplotami (až 1500 °C), tato teplota může vést k problémům s odolností konstrukčního materiálu reaktoru. Reaktor pracuje v malém rozsahu pracovního výkonu. Výhodou takto vyrobeného plynu je jednoduchost čištění, kdy postačuje cyklon a filtr. Nevýhodou je zanedbatelný rozklad dehtu a vysoké nároky na kvalitu dřevěného uhlí. [31]



Obrázek 8. Schéma zplyňovačů – zleva protiproudý, souprroudý a s křížovým tokem [33]

Zplyňovače s fluidním ložem [33]:

- stacionární fluidní vrstva (BFB) – fluidní vrstva je ukončena hladinou, úroveň dehtů se pohybuje od 1 do 2 %
- cirkulující fluidní vrstva (CFB) – vrstva je omezena stropem reaktoru, konverze paliva je tak dokonalejší a vyhoření uhlíku je mnohem větší než u BFB

Zplyňovače s unášivým proudem [33]:

Tyto zplyňovače jsou charakteristické krátkou dobou setrvání částic v reaktoru – cca 1 sekunda, vysokou teplotou v reaktoru 1300 – 1600 °C, vysokým tlakem – 2,5 – 6 MPa a velkými výkony – nad 100 MW.

3.3 Pyrolýza

Pyrolýza je termický rozklad biomasy bez přístupu kyslíku. Tímto způsobem se vyrábí například dřevěné uhlí. Pyrolýza je prvním stupněm při hoření. Většina v současné době provozovaných pyrolýzních systémů je založena na termickém rozkladu odpadu v rotační peci vytápěné zevně spaliny, které vznikají z následného spalování pyrolýzních plynů v tzv. termoreaktoru. K ohřátí biomasy lze použít přímo i horkého inertního plynu (neobsahující kyslík). [24], [35]

Primární (štěpné) reakce – štěpení vazby C-C, C-H, C-O v organických sloučeninách za vzniku nízko molekulových produktů, vznikající produkty mohou vzájemně reagovat. [35]

Produkty pyrolýzy biomasy jsou vždy pyrolýzní (procesní) plyn (obsahuje hlavně metan, vodík, oxid uhličitý, oxid uhelnatý a vodní páru), dehty (bioolej) a pyrolýzní koks. Jaký je podíl jednotlivých složek závisí na složení a původu biomasy, její vlhkosti, velikosti částic biomasy použitých na pyrolýzu, použitého inertního plynu, teploty v horké zóně pyrolýzního reaktoru, doby, po kterou je pyrolýzní plyn v reaktoru, rychlosti ochlazování plynů odcházejících z reaktoru a v neposlední řadě na použití inertního tuhého materiálu respektive katalyzátoru. [35]

Technologie pomalé pyrolýzy – karbonizace

Nejčastější využití pomalé pyrolýzy je pro výrobu dřevěného uhlí. Obvyklá pomalá pyrolýza běžně nazývaná karbonizace při teplotách kolem 450 °C, s nízkou rychlostí zahřívání a dlouhou dobou vypařování poskytuje přibližně vyrovnaný podíl tuhých, kapalných a plynných produktů. [36]

Technologie rychlé pyrolýzy

Rychlá pyrolýza je jedním z nejnovějších procesů přeměny biomasy na produkty s vysokou energetickou hodnotou – kapaliny a plynů. Tento proces je stále ve fázi výzkumu a vývoje, charakteristický je pro něj krátká doba setrvání částic v reaktoru. Při nižších pracovních teplotách vznikají převážně páry a aerosoly (75 %hm), které po rychlém zchlazení kondenzují na kapalinu o výhřevnosti 16 – 22 MJ/kg, kterou je možno upravovat na motorové či jiné biopalivo. Při teplotách vyšších než 800 °C umožňuje vysokou produkci plynů (80 %hm). Inertního materiálu je asi 20krát více než je biomasy, což zaručuje dostatečný tepelný potenciál pro rychlé odplynění. [36]

3.4 Anaerobní fermentace

Řízená anaerobní fermentace je perspektivní způsob ekologického zpracování zbytkové biomasy. Jedná se o bioenergetickou transformaci organických látek, při které nedochází ke snížení jejich hnojivé hodnoty. Tato technologie využívaná v bioplynových stanicích (BPS) je souborem procesů, ve kterých směsná kultura mikroorganismů rozkládá biologicky odbouratelnou organickou hmotu bez přístupu vzduchu. Výslednými produkty jsou biologicky stabilizovaný substrát s vysokým hnojivým účinkem a bioplyn (BP) s obsahem 55 až 70 % metanu a výhřevností v rozmezí 19,6 – 23 MJ/m³, který se využívá k energetickým účelům. [9], [37]

3.4.1 Průběh anaerobní fermentace

Anaerobní fermentace (anaerobní digesce) je biologický proces rozkladu organické hmoty, probíhající za nepřístupu vzduchu. Tento proces probíhá přirozeně v přírodě např. v bažiništích, na dně jezer nebo např. na skládkách komunálního odpadu. Při tomto procesu směsná kultura mikroorganismů postupně v několika stupních rozkládá organickou hmotu. Produkt jedné skupiny mikroorganismů se stává substrátem pro další skupinu. [37]

Proces můžeme rozdělit do 4 hlavních fází [38]:

- **Hydrolýza:** působením extracelulárních enzymů dochází mimo buňky ke hydrolytickému štěpení makromolekulárních látek na jednodušší sloučeniny, především mastné kyseliny a alkoholy, při tomto procesu se uvolňuje rovněž vodík (H₂) a oxid uhličitý (CO₂).
- **Acidogeneze:** působením extracelulárních enzymů dochází mimo buňky ke

hydrolytickému štěpení makromolekulárních látek na jednodušší sloučeniny, především mastné kyseliny a alkoholy, při tomto procesu se uvolňuje rovněž vodík (H_2) a oxid uhličitý (CO_2).

- **Acetogeneze:** dochází k dalšímu rozkladu kyselin a alkoholů za produkce kyseliny octové.
- **Methanogeneze:** závěrečný krok anaerobního rozkladu, kdy z kyseliny octové, H_2 a CO_2 vzniká methan (CH_4), tento krok provádějí methanogenní bakterie, což jsou striktně anaerobní organismy.

Aby proces anaerobní digesce probíhal správně, je třeba zajistit vhodné životní podmínky pro činnost mikroorganismů. Těmi jsou [39]:

- striktně anaerobní prostředí
- optimální pH
- stálá teplota
- vhodné složení substrátu

Z hlediska reakčních teplot rozdělujeme anaerobní procesy, podle optimální teploty pro mikroorganismy na psychofilní ($5 - 30\text{ }^{\circ}C$), mezofilní ($30 - 40\text{ }^{\circ}C$), termofilní ($45 - 60\text{ }^{\circ}C$) a extrémně termofilní (nad $60\text{ }^{\circ}C$). Výhodou procesů prováděných za vyšších teplot je hlavně vyšší účinnost hygienizace materiálu. Většina zemědělských BPS využívá mezofilní režim. Důvodem k tomu může být to, že na udržení teploty je v tomto případě potřeba menší množství tepla, proces je méně citlivý k nehodou zapříčiněným výkyvům teplot a lépe se uvádí do provozu, neboť také bakterie přítomné ve zvířecích exkrementech jsou zvyklé na teploty okolo $37\text{ }^{\circ}C$. Pro náročnější průmyslové technologie či vyhnívací nádrže na ČOV se používá termofilní režim např. z důvodů vyšší rozpustnosti tuků. [38], [40]

3.4.2 Kategorizace BPS

Podle druhu vstupů rozlišujeme BPS na [41], [42]:

- **Zemědělské BPS**, jejichž vstupy lze hodnotit jako nejméně problematické. Zpracovávají pouze vstupy ze zemědělské prvovýroby, zejména statková hnojiva (keřda, hnůj apod.) a cíleně pěstované plodiny (např. kukuřice) k energetickému využití. Jsou většinou situovány v areálech stávajících zemědělských provozů a zpracováním a stabilizací statkových hnojiv výrazně snižují dosavadní zatížení oblasti pachovými látkami. Zemědělské bioplynové stanice jsou v tuzemsku nejhojněji zastoupeny.
- **Kofermentační BPS** (také průmyslové BPS), které zpracovávají výhradně nebo v určitém podílu rizikové vstupy, např. jateční odpady, kaly ze specifických provozů, kaly z ČOV, tuky, masokostní moučku, krev z jatek apod. Pro fermentaci těchto vstupů je nezbytné pečlivě zvolit technologii zařízení a zpracovat kvalitní provozní řád zařízení.
- **Komunální BPS**, které jsou speciálně zaměřeny na zpracování komunálních bioodpadů, zejména z údržby zeleně, vytríděných bioodpadů z domácností a restaurací a jídelen.

3.4.3 Rozdělení technologií BPS podle sušiny substrátu

Z hlediska obsahu sušiny ve zpracovávaném vstupním substrátu existují dvě základní

technologie BPS, které jsou nazývány mokrá fermentace a suchá fermentace. [41]

Mokrá fermentace využívá obvykle fermentoru s vertikální osou a materiál ve fermentoru má sušinu do 12 %. V praxi to znamená, že materiály s vyšším obsahem sušiny (hnůj, podestýlka, různé druhy siláží a senáží) se před vstupem do fermentoru ředí na odpovídající podíl sušiny kejdou nebo procesní vodou, vyseparovanou z již zfermenovaného kalu. Proces pracuje s určitým ustáleným stavem, proto je nutné dodržovat základní provozní parametry. Některé z nich je nutno sledovat již při návrhu technologie: velikost reaktorů a jejich účinnost (záleží na míchání), zatížení reaktorů vnosem organické hmoty, koncentrace amoniakálního dusíku v reaktorech. Pro eliminaci možných negativních vlivů technologie (především zápach digestátu na výstupu) je často využíváno vícestupňových systémů se sériově řazenými fermentory a dofermentory (dohnívacími nádržemi). Většina aplikací v ČR je v současnosti založena na mokré technologii. [41], [43]

Suchá fermentace zpracovává substráty o sušině 30 až 35 %. Zpravidla jde o aplikace mezofilního anaerobního procesu, rozsah používaných reakčních teplot 32 – 38 °C. Optimální pH se pohybuje mezi 6,5 – 7,5. Proces probíhá následovně. Biomasa je navedena do fermentoru kolovým nakladačem. Po naplnění fermentoru jsou uzavřena plynotěsná vrata. Biomasa je vyhřívána podlahovým topením a postřikem perkolátu, který současně obnovuje mikrobiální kulturu na povrchu biomasy. Do tří dnů po navedení dojde k odstranění zbytkového kyslíku a stabilizaci celého anaerobního procesu. Vznikající bioplyn je odsáván do plynových vaků. Proces je diskontinuální, obvyklá délka cyklu je 28 dnů. Pro kontinuitu procesu se doporučuje pracovat minimálně se čtyřmi fermentory. Na konci cyklu je biomasa vyvezena a část vyfermentovaného substrátu je nahrazena novou biomasou v tzv. směsném navýšení (poměr mezi starou, částečně vyfermentovanou biomasou a čerstvou biomasou). Technologie suché fermentace je vhodná zejména pro biomasu s vyšším obsahem sušiny. Dokáže efektivně využít i materiály, které nelze jednoduše zpracovat např. nedokonale vytríděné BRO – příměsi plastů, dřeva, kovů, zeminy, atd. Mezi další přednosti se řadí menší nároky na potřebnou mechanizaci, nižší spotřebu vody a minimální provozní náklady. [44], [45], [46]

3.4.4 Možnosti využití produktů anaerobní fermentace

Hlavními produkty anaerobní fermentace organické hmoty jsou bioplyn, digestát a fugát.

Bioplyn je bezbarvý plyn skládající se hlavně z methanu a oxidu uhličitého. BP může ovšem obsahovat ještě malá množství dusíku N_2 , sirovodíku H_2S , amoniaku NH_3 , vody H_2O , ethanu a nižších uhlovodíků. Problémovou složkou BP je naopak sirovodík H_2S , jenž je při spalování BP příčinou tvorby kyseliny sírové (H_2SO_4), která při kondenzaci ze spalin způsobuje korozi. Proto se musí sirovodík při vyšší koncentraci z BP odstraňovat. K tomuto účelu se nejčastěji používá chemická adsorpce H_2S do pevné látky (FeO , Fe_2O_3), nebo biologická metoda využívající sírných bakterií, které v aerobním prostředí oxidují H_2S na elementární síru a sírany v závislosti na teplotě a pH. [38], [39]

Digestát je tuhý zbytek po vyhnití se sníženým obsahem biologicky rozložitelných látek. Tento materiál, pokud vyhovuje všem parametrům stanoveným vyhláškou Ministerstva životního prostředí, lze využít jako hnojivo, přídavek do kompostu nebo k povrchové úpravě terénu. [39]

Fugát, nebo-li procesní voda, je tekutý produkt vyhnívacího procesu a má charakter vody odpadní. Je silně zakalený a obsahuje produkty anaerobního rozkladu organických látek. Zpravidla je odváděn do čistírny odpadních vod. [39]

Hlavní způsoby využití BP jsou [37]:

- přímé spalování a ohřev teplotnosného média (např. topení, sušení, chlazení),
- výroba elektrické energie a ohřev teplotnosného média (kogenerace),
- výroba elektrické energie, tepla a chladu (trigenerace),
- palivo pro pohon mobilních energetických prostředků,
- neenergetické využití BP (chemická výroba sekundárních produktů z BP).

V současnosti nejrozšířenějším způsobem využití BP je kogenerace. Kogenerační jednotky využívají BP na kombinovanou výrobu elektrické energie (cca 35 % celkové energie) a tepla s vysokou účinností až 90 %. Spalovací motor na BP pohání generátor elektrické energie a zároveň se využívá teplo z chladicího média motoru, popř. tepla ze spalín. Část tepla se využívá k vytápění fermentoru. Perspektivním způsobem využití BP je trigenerace. Kogenerační jednotka je zde doplněna absorpčním tepelným konvertorem pro výrobu chladu. Pro pohon mobilních energetických prostředků musí být BP odsířen, zbaven mechanických nečistot a energeticky zhodnocen nad úroveň odpovídající 90 % CH₄. [37]

3.5 Transformace tepelné energie z biomasy

3.5.1 Rankin-Clausiiův cyklus

V klasických tepelných elektrárnách je energie tepelná transformována na mechanickou v tepelném oběhu, který nazýváme Rankin-Clausiiův cyklus (RC). Tento elektrárenský kondenzační cyklus, ve své podstatě složený ze základních termodynamických změn, používá jako pracovní látku vodu resp. vodní páru. Voda na mezi sytosti, která je přivedena napájecím čerpadlem do parního generátoru (kotle), se v něm ohřívá, odpařuje a v parním přehříváku dosahuje parametrů vstupní (tzv. admisní) páry. Tyto parametry jsou závislé na použité teplotě. V případě nižších teplot je možné vyrobit pouze sytou páru. Při použití vysokých teplot lze získat až vysoce přehřátou páru. Vyrobená pára expanduje v parní turbíně, čímž se získává technická práce. Výstupní (tzv. emisní) pára vstupuje buď do kondenzátoru, nebo do tepelného výměníku, přičemž může do tepelné spotřeby vstupovat veškeré množství páry jdoucí přes turbínu (protitlaký provoz). Požadavky na kvalitu užitečně využívaného tepla určují hodnotu tlaku, při kterém se provádí odběr tepla. S ohledem na místo odběru tepelné energie pro dodávku tepla a množství páry podílející se na výrobě elektrické energie a tepla se dají systémy s parními turbínami rozdělit na [17], [47]:

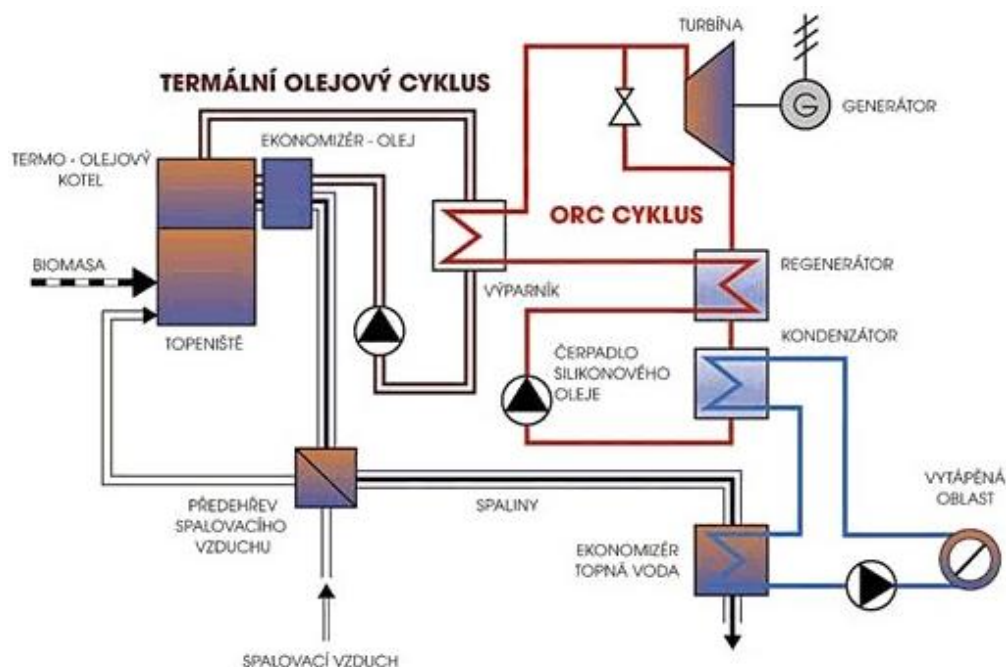
- protitlaké
- kondenzační

Protitlaké turbíny využívají pro dodávku tepla veškeré množství páry použité pro získání technické práce. Teplo je odebíráno na výstupu z turbíny. Čím vyšší jsou požadavky na teplotu tepelného odběru, tím vyšší musí být vstupní teplota, a tím se snižuje účinnost přeměny na elektrickou energii. Celkové využití paliva je vysoké, ale získaná elektrická energie je nízká. [17]

U **kondenzačních turbín** se preferuje výroba elektrické energie. Čisté kondenzační turbíny pracují hlavně jako zdroj elektrické energie. Kondenzační teplo je z oběhu odváděno při teplotě okolí, a tím se dosahuje maximalizace zisku elektrické energie. Odváděné teplo se však v důsledku nízké teploty nedá užitečně využít. Dodávka tepla se může realizovat odběrem páry z turbíny v průběhu její expanze, popřípadě odběrem přímo na výstupu z parního generátoru. [17]

Organický Rankinův cyklus (ORC) je elektrárenský kondenzační cyklus, který používá namísto vody resp. vodní páry, jako pracovní látku v primárním okruhu směs organických sloučenin (silikonový olej), které jsou svými termodynamickými vlastnostmi vhodné k použití v tepelném oběhu. Výhodou oleje je, že při dané teplotě (např. 300 °C) se udrží v kapalném stavu při značně nižším tlaku než voda. [47]

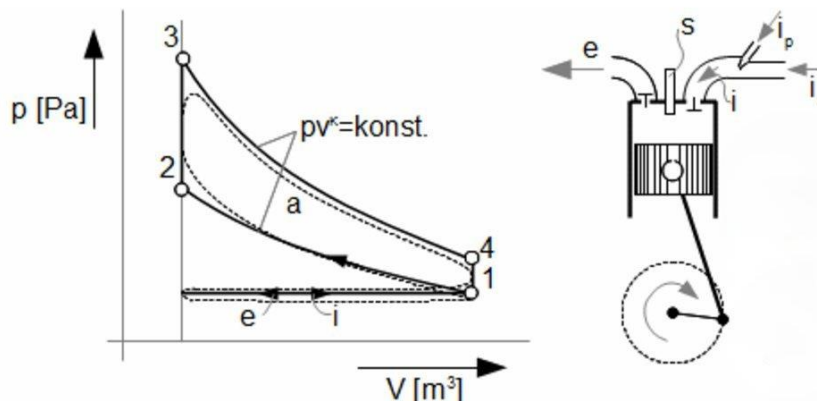
Typické využití ORC se nabízí ve spojení s kotelny na biomasu, kde je primární energie v palivu využita jednak na výrobu tepla, ale i elektrické energie. V takovém případě je celková účinnost kogenerace cca 85 %. [47]



Obrázek 9. Schématické uspořádání ORC při využití kogenerace [48]

Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.4.4, nejběžnějším způsobem využití bioplynu je kombinovaná výroba elektřiny a tepla v kogeneračních jednotkách (KJ). V KJ na bioplyn bývá umístěn spalovací motor, který může být dvojího typu - zážehový nebo vznětový. Nejčastěji se používá zážehový plynový motor, u něhož je výhradním palivem bioplyn. Tento motor pracuje na základě Ottova oběhu. [49]

Ideální Ottův oběh je rozdělen do čtyř termodynamických vratných změn, které jsou realizovány ve válci s pístem a dvěma ventily (sací a výfukový). Celý oběh se realizuje během dvou během dvou zdvihů pístu (čtyři doby nebo též čtyři takty). Pracovní látkou je hořlavá směs nejčastěji vzduchu a hořlavých par paliva. Jednotlivé fáze oběhu jsou zachyceny na p-V digramu na obrázku 10 a probíhají následovně [50]:



Obrázek 10. p-V diagram Ottova oběhu [50]

Oběh začíná sáním pracovní směsi (značí písmeno i), následně se píst se pohybuje k dolní úvrati při otevřeném sacím ventilu. Mezi body 1 až 2 probíhá izoentropická komprese pracovní směsi, sací ventil uzavřen. Mezi body 2 až 3 probíhá hoření směsi – ve stavu 2 dojde pomocí zapalovací svíčky (značí písmeno s) k iniciaci hoření směsi, která velice rychle shoří, přičemž se zvýší její tlak a teplota na stav 3. Ideálně hoření probíhá izochoricky – píst se nepohybuje. Mezi body 3 až 4 se odehrává expanze horkých spalin – izoentropická expanze horkých spalin ze stavu 3 do stavu 4. Přitom spaliny působí na píst silou, a ten se pohybuje do své dolní úvrati. Fáze 4 až 1 značí výfuk – ve stavu 4 se otevře výfukový ventil a větší část spalin je z válce vyfouknuta do výfuku. Oběh je ukončen po vytlačení zbylých spalin z válce, tj. po vyrovnání tlaku spalin ve válci s okolím. Píst při pohybu k horní úvrati vytlačí zbývající spaliny z válce přes otevřený výfukový ventil (značí písmeno e). Nyní se celý oběh může opakovat.

4 PRODUKCE ELEKTŘINY A TEPLA Z BIOMASY V ČR

4.1 Podíl biomasy a bioplynu na výrobě elektrické a tepelné energie v roce 2015

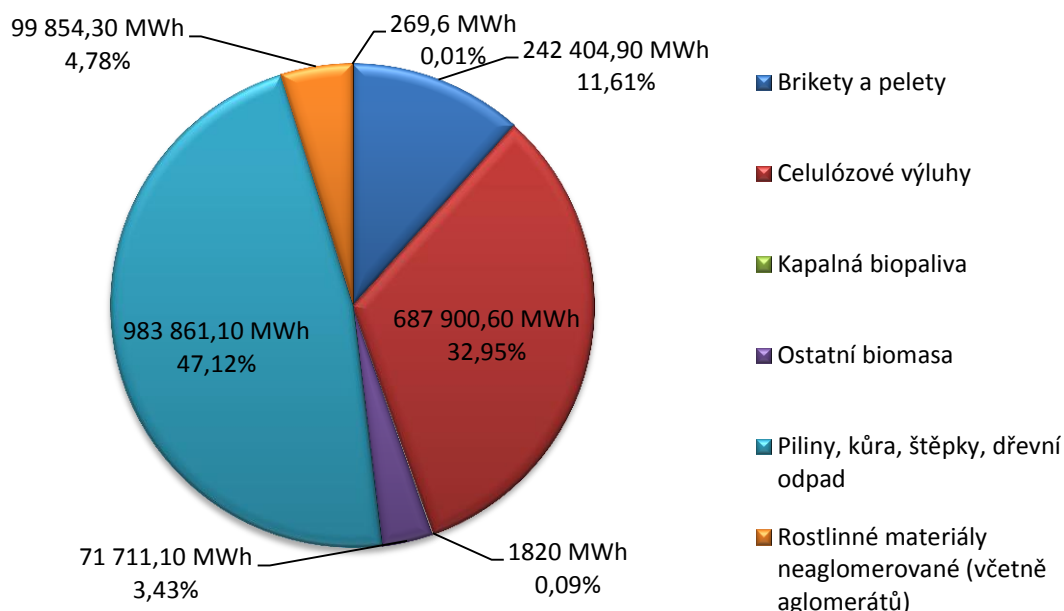
4.1.1 Výroba elektřiny brutto

Celková výroba elektrické energie v tomto roce meziročně klesla o 2,5 % na 83 886,6 GWh. Produkce elektřiny z OZE vzrostla v porovnání s rokem 2014 o 1,7 % na 9 327,2 GWh. Podíl OZE na celkové výrobě také stoupl o 0,46 % na 11,12 %. Z biomasy se vyrobilo o 3,87 % více elektřiny než v roce 2014, a to 2087,8 GWh. Téměř třetinu elektřiny z OZE vyprodukoval bioplyn, z kterého se získalo 2 609,9 GWh, což představuje meziroční nárůst o 1,66 %. [51], [52]

Tabulka 2 Výroba elektrické energie brutto v roce 2015 [51]

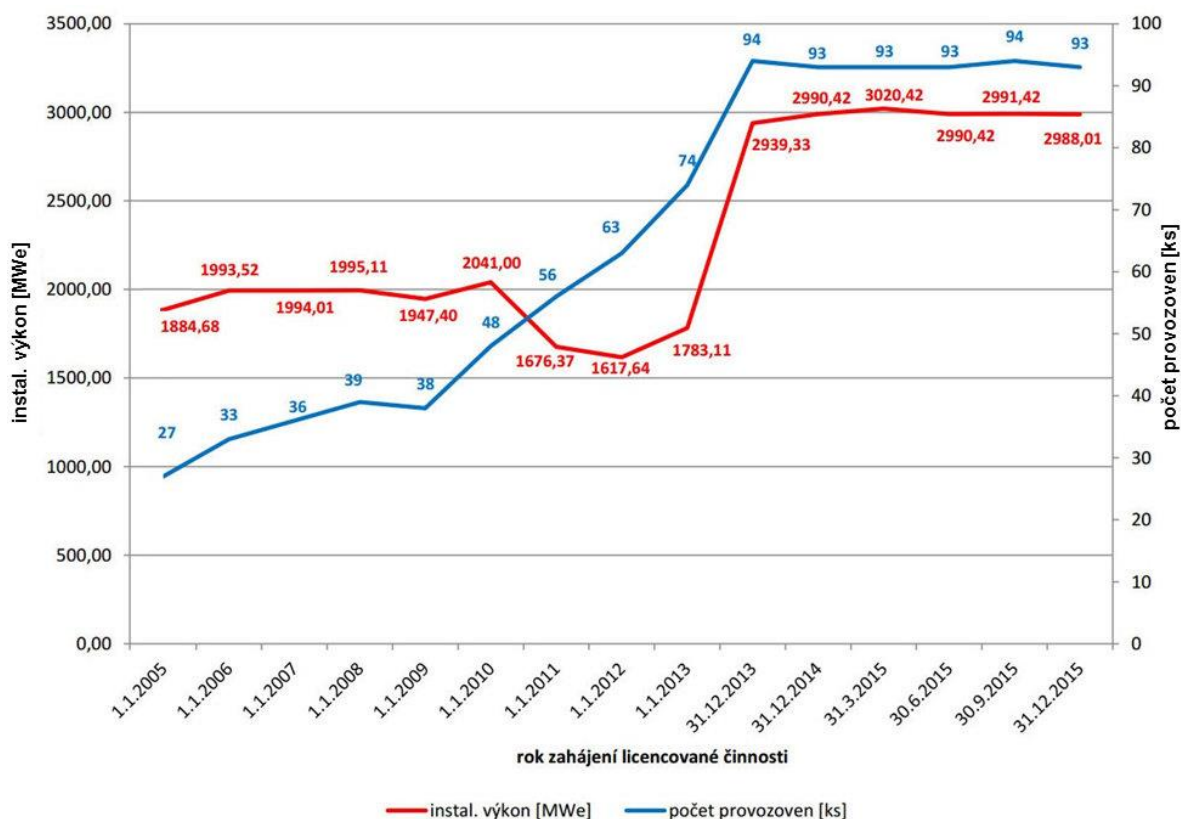
	Výroba elektřiny brutto [GWh]	Podíl na celkové výrobě [%]	Podíl na OZE [%]
Celkem	83 886,6	-	-
OZE	9 327,2	11,12	-
Biomasa	2 087,8	2,49	22,38
Bioplyn	2 609,9	3,11	27,98

Největší část brutto produkce elektřiny z biomasy zaujímal podíl pilin, kůry, štěpky a dřevního odpadu s hodnotou 983,86 GWh, jak je znázorněno na obrázku 11. Z celulóзовých výluh se získalo 687,9 GWh. Třetí největší podíl tvořily brikety a pelety 242,4 GWh na celkovou výrobu.



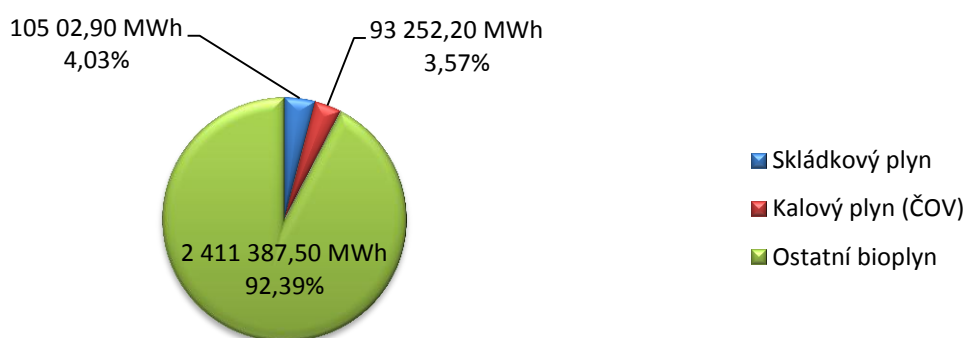
Obrázek 11. Podíl kategorií biomasy na výrobě elektřiny brutto [vlastní zpracování dle 51]

Z grafu na obrázku 12 lze vyčíst, že od roku 2009 začal výrazně stoupat počet nových provozoven vyrábějících elektřinu z biomasy. Tento růst se zastavil na konci roku 2013. V následujících letech se jejich počet již prakticky neměnil. Instalovaný výkon také zůstal téměř konstantní a k 31. 12. 2015 má velikost 2988,01 MWe.



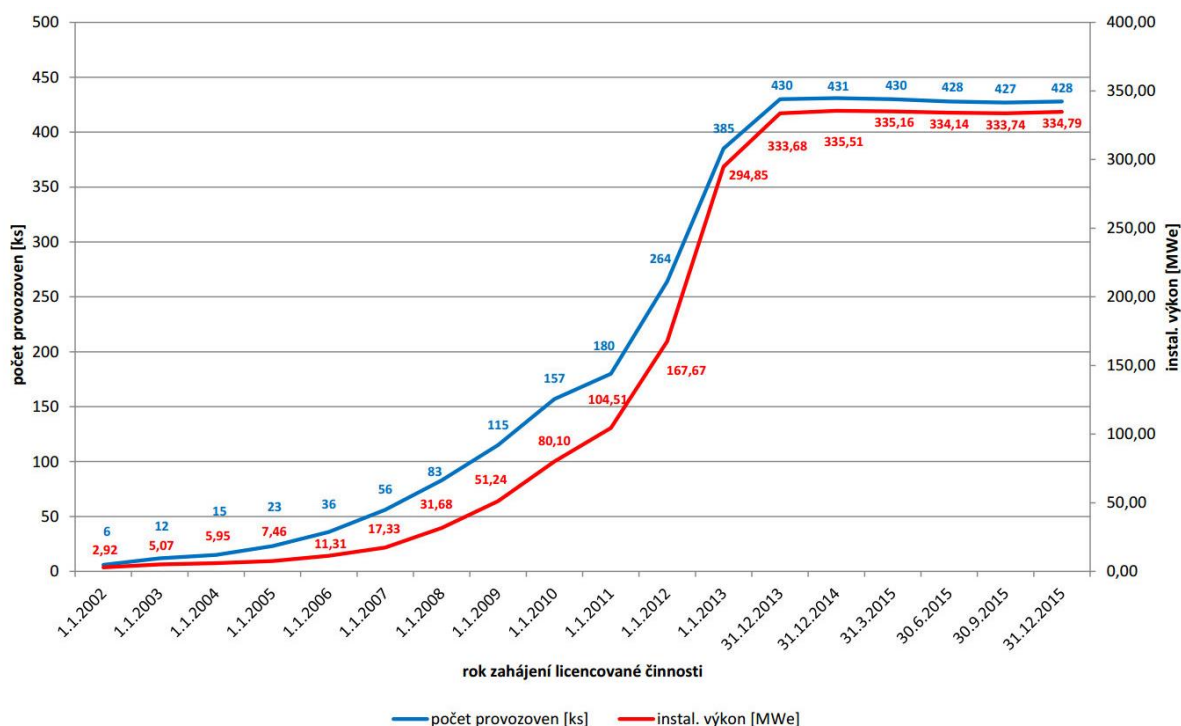
Obrázek 12. Vývoj počtu provozoven a instalovaného výkonu [53]

Z následujícího grafu je patrné, že majoritní část o velikosti 2 411,3 GWh při výrobě elektřiny z bioplynu zaujímala kategorie Ostatní bioplyn, kam se řadí bioplyn z BPS. Skládkový plyn přispěl 105 GWh a z kalového plynu se vyrobilo 93,3 GWh.



Obrázek 13. Podíl kategorií bioplynu na výrobě elektřiny brutto [vlastní zpracování dle 51]

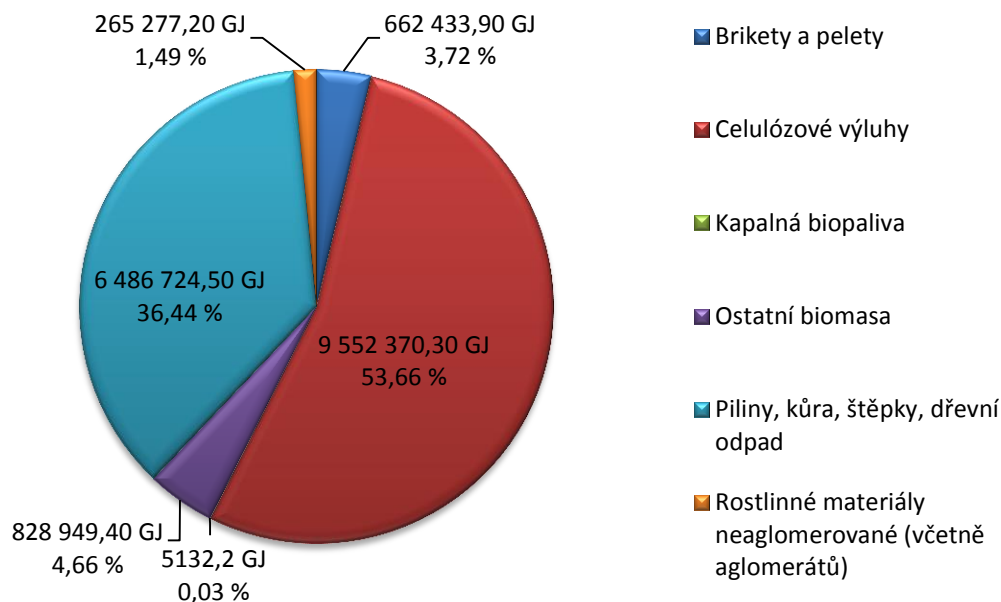
V roce 2015 nebyla zprovozněna žádná nová bioplynová stanice, došlo pouze k rozšíření jedné výroby o nový zdroj ORC o výkonu 175 KW. Omezení nárůstu bioplynových stanic, jenž je zobrazen na obrázku 14, je důsledkem zákona č. 310/2013 Sb., kterým došlo ke změně zákona č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie. Podle této úpravy byla v podstatě zastavena podpora elektřiny z obnovitelných zdrojů uvedených do provozu po 31. 12. 2013.



Obrázek 14. Vývoj počtu provozoven a instalovaného výkonu [54]

4.1.2 Výroba tepla brutto

V roce 2015 se produkce hrubého tepla z biomasy zvýšila oproti předešlému roku o 2,28 % na 17 800,9 TJ. U bioplynu byl meziroční nárůst dokonce 18,15 %. Díky tomu se z bioplynu získalo 5 528,7 TJ.

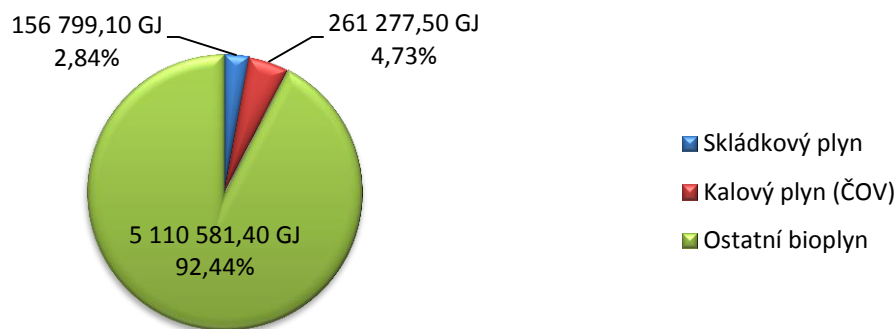


Obrázek 15. Podíl kategorií biomasy na výrobě tepla brutto [vlastní zpracování dle 51]

Největší podíl biomasy na výrobě tepla zaujímaly celulóznové výluhy, jak je patrné z grafu na obrázku 15. Získalo se z nich 9 552,4 TJ. Z pilin, kůry, štěpky a dřevního odpadu se vyrobilo 6 486,7 TJ. Z briket a pelet vzniklo 662,4 TJ. Kategorie Ostatní biomasa se podílela 828,9 TJ na celkové výrobě tepla.

Graf na obrázku 16 prezentuje rozdělní podílů bioplynu při výrobě tepla. Největší část

zaujímá kategorie Ostatní bioplyn, který vyprodukoval 5 110,6 TJ. Ze skládkového plynu se získalo 156,8 TJ a z kalového plynu vzniklo 261,3 TJ.



Obrázek 16. Podíl kategorií bioplynu na výrobě tepla brutto [vlastní zpracování dle 51]

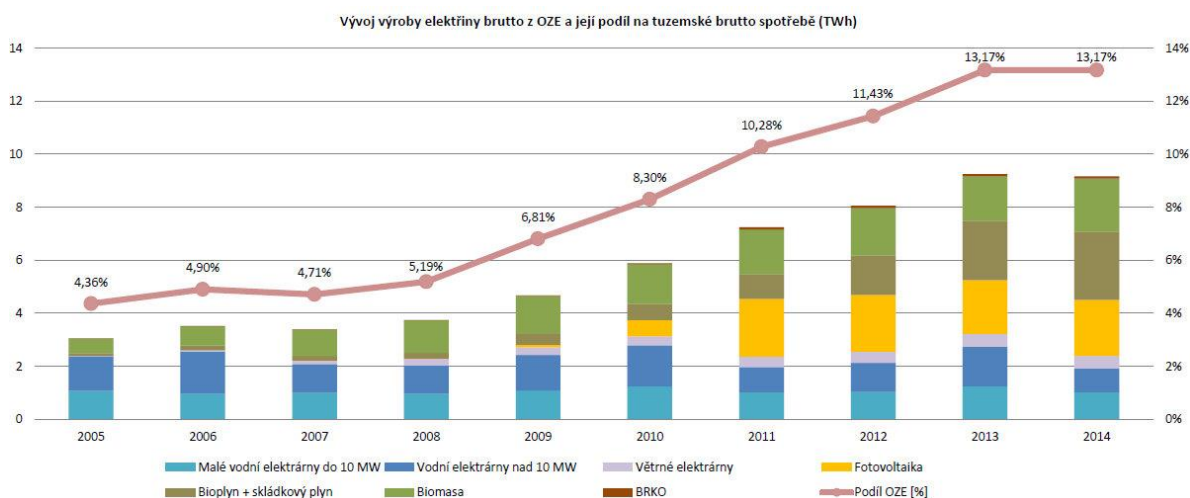
4.2 Podíl biomasy a bioplynu na výrobě tepelné a elektrické energie v roce 2014

4.2.1 Výroba elektřiny brutto

V roce 2014 se vyprodukovalo 86 003,4 GWh hrubé elektřiny. OZE k celkové výrobě elektřiny přispělo 9 169,7 GWh, čemuž odpovídá podíl 10,66 %. Z biomasy se vyrobilo 2 007 GWh, na produkci OZE se podílelo 21,89 %. 2 566,7 GWh se získalo z bioplynu, jeho podíl na OZE činil 27,99 %.

Tabulka 3. Výroba elektrické energie brutto v roce 2014 [52]

	Výroba elektřiny brutto [GWh]	Podíl na celkové výrobě [%]	Podíl na OZE [%]
Celkem	86 003,4	-	-
OZE	9 169,7	10,66	-
Biomasa	2 007,0	2,33	21,89
Bioplyn	2 566,7	2,98	27,99

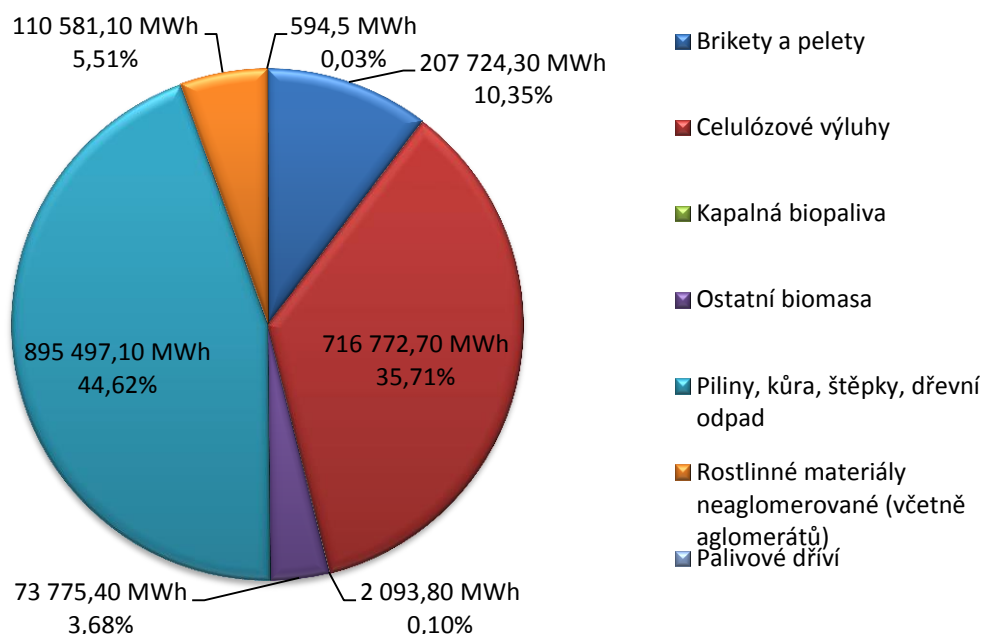


Obrázek 17. Vývoj produkce hrubé elektřiny z OZE [55]

Podíl energie z obnovitelných zdrojů na tuzemské brutto spotřebě setrval v roce 2014

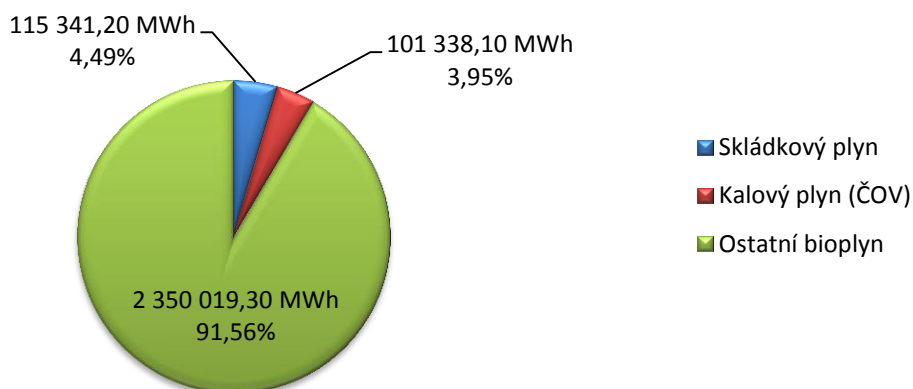
na hodnotě 13,17 %. Z grafu na obrázku 17 lze vyčíst, že výroba elektřiny brutto z OZE stabilně roste od roku 2007. Největší podíl na tomto růstu má rozvoj fotovoltaiky, využívání biomasy a bioplynu. Podíl energie z obnovitelných zdrojů na hrubé spotřebě energie v ČR má do roku 2020 vzrůst na 15,9 %. [56]

Majoritní část produkce hrubé elektřiny z biomasy tvoří piliny, kůra, štěpky a dřevní odpad, ze kterých se vyrobilo 895,5 GWh. Z celulózových výluhů se vyprodukovalo 716,8 GWh. Brikety a pelety se podílely 207,7 GWh na celkové výrobě elektřiny.



Obrázek 18. Podíl kategorií biomasy na výrobě elektřiny brutto [vlastní zpracování dle 52]

Z grafu na obrázku 19 lze vyčíst, že největší podíl ve výrobě tepla z bioplynu zaujímá ostatní plyn. Jeho velikost byla 2 350 GWh. Ze skládkového plynu se vyprodukovalo 115,3 GWh a z kalového plynu vzniklo 101,3 GWh.



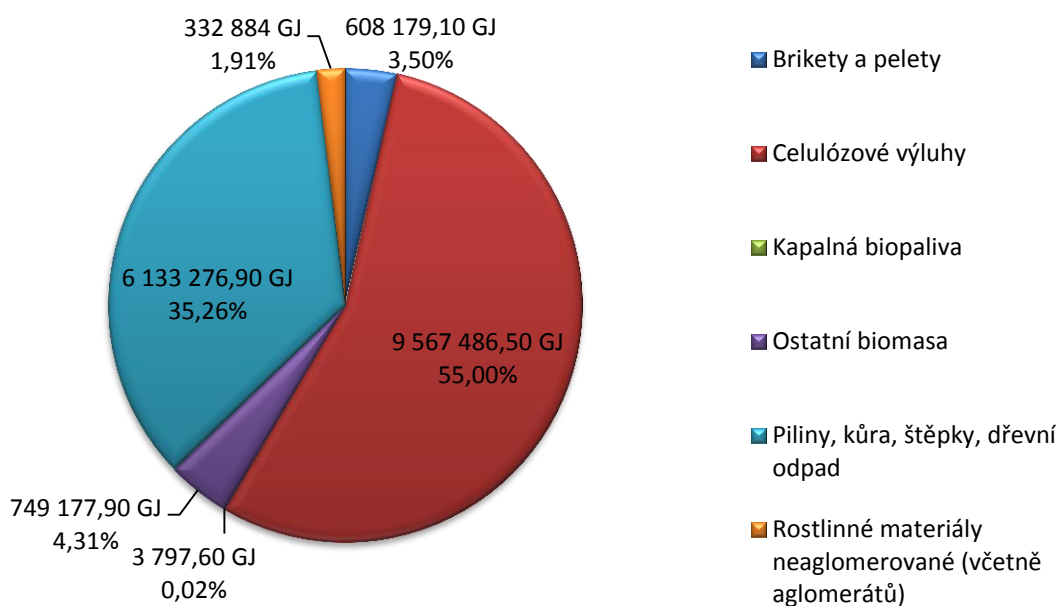
Obrázek 19. Podíl kategorií bioplynu na výrobě elektřiny brutto [vlastní zpracování dle 52]

4.2.2 Výroba tepla brutto

V roce 2014 se z biomasy vyrobilo 17 394,8 TJ hrubého tepla. Z bioplynu se získalo 4 679,2 TJ.

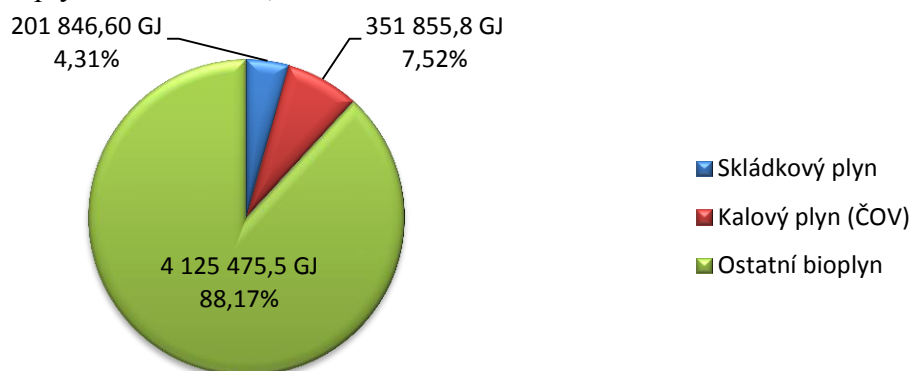
Majoritní část biomasy na produkci tepla zaujímaly celulózové výluhy, jak je znázorněno v grafu na obrázku 20. Vyrobilo se z nich 9 567,5 TJ. Z pilin, kůry, štěpky a dřevního odpadu

se získalo 6 133,3 TJ.



Obrázek 20. Podíl kategorií biomasy na výrobě tepla brutto [vlastní zpracování dle 57]

Z grafu na obrázku 21 můžeme vyčíst, že největší část na výrobu tepla z bioplynu tvoří ostatní bioplyn, ze kterého se vyprodukovalo 4 125,5 TJ. Skládkový plyn se podílel 201,8 TJ na výrobě. Z Kalového plynu vzniklo 351,9 TJ.



Obrázek 21. Podíl kategorií bioplynu na výrobě tepla brutto [vlastní zpracování dle 57]

5 VYBRANÉ ENERGETICKÉ CELKY ČR

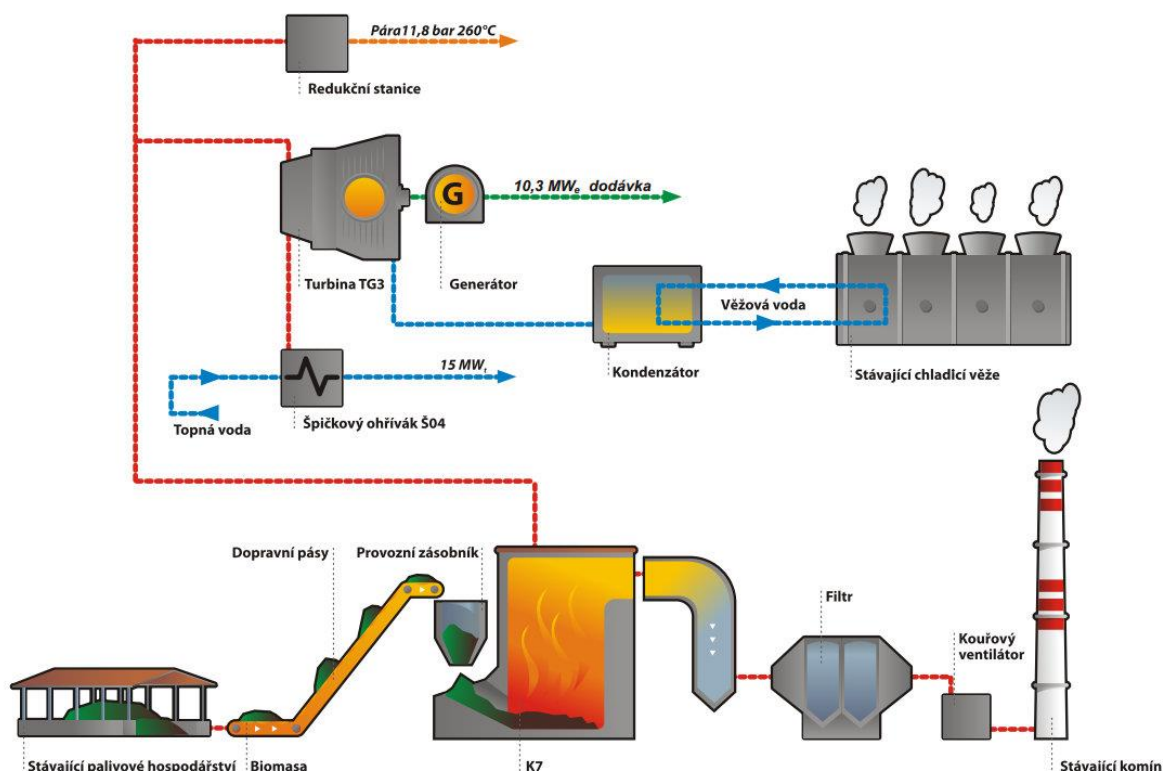
V této kapitole uvedu příklady realizací kombinované výroby energie z biomasy. Za sebou jsou vždy seřazeny dva typy zařízení, které pracují na základě stejného principu, a to na RC cyklu, na ORC cyklu a na Ottově oběhu.

5.1 Plzeňská teplárenská a.s.

K výrobě tepla a elektřiny se v Plzeňské teplárenské a.s. využívá mimo jiné energetický blok, který se skládá z kotle K7 a turbosoustrojí TG3 vč. tepelného výměníku. Jmenovitý výkon generátoru TG3 je 13 500 kW. Maximální tepelný výkon ŠO4 je 15 MWt. Schéma bloku se nachází na obrázku 22. Navržená technologie kotle K7 umožňuje spalování paliva na stacionárním roštu s využitím principů fluidní techniky. Palivo je převážně na bázi dřevní štěrky a kůry. Celý blok byl uveden do provozu v květnu 2010. [58], [59]

Tabulka 4. Parametry kotle K7 [58], [59]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý parní výkon	45	t/h
Jmenovitý tlak přehřáté páry	6,7	MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry	485	°C
Účinnost při jmenovitém výkonu	91	%



Obrázek 22. Schéma energetického bloku [60]

5.2 Teplárna Frýdek-Místek

Biomasová elektrárna ve Sviadnově slouží ke kombinované výrobě elektřiny a tepla. Parní kotel od firmy EKOL je určen ke spalování biomasy ve formě dřevní štěpky s možným přimísením pilin a cíleně pěstovaných dřevin a travin o výhřevnosti 6,5 až 12 MJ/kg. Rošt kotle je protiběžný, vzduchem chlazený. Vyrobená pára z kotle je odváděna do protitlakové turbíny EKOL s tzv. potlačenou kondenzací a dvěma neregulovanými odběry. Turbína je konstrukčně navržena jako vysokootáčková, jednotělesová s horizontálně dělenou skříní a nosiči statorových lopatek. Svorkový výkon turbíny je 5,8 MW při 9466 ot/min. Teplárna je v provozu od června 2013. [61], [62]

Tabulka 5. Parametry kotle EKOL [61], [62]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý parní výkon	23	t/h
Jmenovitý tepelný výkon	18	MWt
Jmenovitý tlak přehřáté páry	6,4	MPa
Jmenovitá teplota přehřáté páry	485	°C
Účinnost při jmenovitém výkonu	88,5	%



Obrázek 23. Strojovna teplárny Frýdek-Místek [62]

5.3 Teplárna Trhové Sviny

Probíhá zde společná výroba tepla a elektrické energie s využitím systému ORC. V teplárně jsou instalovány následující zdroje [63]:

- 3 plynové kotle (3 x 2,91 MWt), z nichž jeden je ve stavu studené zálohy
- kotel na spalování biomasy o tepelném výkonu 2,5 MWt
- termoolejový kotel Kohlbach na spalování dřevní biomasy o tepelném výkonu 3,5 MWt
- jednotka ORC o elektrickém výkonu 0,6 MWe
- 2 plynové kogenerační jednotky o celkovém elektrickém výkonu 0,044 MWe a celkovém tepelném výkonu 0,091 MWt

V provozu teplárny mají prioritu oba kotle spalující biomasu, přičemž maximální roční využití se předpokládá u termoolejového kotle Kohlbach, který je zdrojem tepla pro jednotku ORC technologie TURBODEN. Jako špičkové zdroje v dodávce tepla slouží dva plynové kotle (palivo zemní plyn). [63], [64]

Tabulka 6. Parametry systému s ORC [63]

Parametr		Hodnota	Jednotka
Výkon termoolejového kotle		3,5	MWt
Výkon jednotky ORC	tepelný	2,8	MWt
	elektrický	0,6	MWe
Účinnost zařízení při jm. výkonu	tepelná	80	MWt
	elektrická	17,1	MWe



Obrázek 24. Areál teplárny Trhové Sviny [65]

5.4 Třebíč - Teplárna Sever

V teplárně Sever je umístěno několik kotlů pro získání tepla z různých druhů biomasy. Kotel VESKO-S o výkonu 5 MWt spaluje balíky slámy. Kotel VESKO-B o výkonu 3 MWt slouží na spalování dřevní biomasy. Termoolejový kotel VESKO-T o výkonu 7 MWt slouží na spalování dřevní biomasy na přesuvném roštu, nad kterým vhodně tvarovaná klenba vyvozuje protiproudé uspořádání spalín. Tento proces napomáhá ke zkrácení doby vysušení paliva. Spodní část kotle tvoří ohniště se suvným šikmým roštem. Na kotli je postaven hlavní olejový výměník, v němž probíhá ohřev pracovní látky okruhu ORC. Provedení a zapojení termoolejového kotle umožňuje jak provoz současné výroby tepla a elektrické energie tak pouze provoz výroby tepla, kdy je veškeré teplo z termoolejového okruhu vedeno přes paralelní výměník olej/voda a přes vložený okruh voda/voda do systému CZT. [66], [67], [68]

Tabulka 7. Parametry systému s ORC [63]

Parametr		Hodnota	Jednotka
Výkon termoolejového kotle		7	MWt
Výkon jednotky ORC	tepelný	5,38	MWt
	elektrický	1	MWe
Účinnost zařízení při jm. výkonu	tepelná	80	MWt
	elektrická	18	MWe



Obrázek 25. Teplárna Sever [69]

5.5 BPS Kouty

Bioplynová stanice Kouty se řadí mezi zemědělské BPS, využívá technologii mokré fermentace. Bioplyn vzniká ve třech sériově zapojených fermentorech. Významné zastoupení travní senáže (v ročním souhrnu představuje 30 – 40 % celkové vsázky) umožňuje nejen zvolená míchací technika, ale i vyšší teplota ve fermentorech (okolo 48 °C), která se tak blíží termofilnímu provozu. Vyrobený bioplyn se spaluje ve třech kogeneračních jednotkách Schnell o totožném výkonu 250 KWe. [70]

Tabulka 8. Základní údaje o BPS Kouty [70]

Uvedení do provozu		Červenec 2009
Produkce elektřiny ročně brutto		5,8 až 6,2 GWh
Produkce tepla ročně brutto		5,5 až 5,8 TJ
Instalovaný výkon	tepelný	696 KWt
	elektrický	750 KWe
Vstupní suroviny		Travní siláž, kukuřičná siláž, hovězí hnůj a kejda
Celkový objem fermentorů		6900 m ³



Obrázek 26. Propojení fermentorů BPS Kouty [70]

5.6 BPS Žďár nad Sázavou

Bioplynová stanice Žďár nad Sázavou zpracovává BRKO, jedná se tedy o komunální BPS. Je zde použita technologie suché fermentace. Důležitou součástí technologie je i příjmová a hygienizační linka pro příjem bioodpadů z potravinářství. Stanice je vybavena celkem sedmi fermentory. Zdrojem technologického tepla pro chod stanice (ohřev fermentorů, hygienizace) není jak je obvyklé kogenerační jednotka na bioplyn, ale alespoň z počátku plynový kotel o výkonu 178 kW. Energetické využití bioplynu bylo z důvodu energetické maximalizace přesunuto z místa stanice do cca 1,5 km vzdáleného průmyslového závodu ŽĎAS, a.s., se kterým byl provoz spojen podzemním plynovodem na bioplyn. V areálu podniku je instalována kogenerační jednotka o výkonu 600 kWt a 608 kWt. Vyráběné teplo i elektřina je plně využívána přímo v energetice závodu, což lze považovat v českých podmínkách za unikátní. [70]

Tabulka 9. Základní údaje o BPS Žďár nad Sázavou [70]

Uvedení do provozu		prosinec 2010
Produkce elektřiny ročně brutto		4,2 až 4,5 GWh
Produkce tepla ročně brutto		4,6 až 4,9 TJ
Instalovaný výkon	tepelný	600 KWt
	elektrický	608 KWe
Vstupní suroviny		Komunální odpad ze separovaných sběrů, zemědělská biomasa
Celkový objem fermentorů		1000 m ³



Obrázek 27. Kogenerační jednotka průmyslového závodu ŽĎAS [70]

6 ZÁVĚR

Na začátku práce byl definován pojem biomasa a uvedeny vlastnosti důležité při jejím energetickém využití. Mezi ty nejdůležitější patří výhřevnost a spalné teplo, které negativně ovlivňuje vlhkost použité biomasy. V závislosti na obsahu vody v biomase se volí technologie pro její zpracování. Pokud je obsah sušiny více než 50 %, používají se tzv. suché procesy. Jedním z nich je spalování biomasy. Spalování patří mezi nejstarší využívání biomasy. Konstrukce kotlů odpovídá charakteristickým vlastnostem biomasy, mezi které náleží vysoký obsah prchavé hořlaviny nebo hoření tzv. dlouhým plamenem. Princip spalování na roštu nebo ve fluidní vrstvě se využívá v kotlech velkých energetických celků.

Biomasu s obsahem sušiny menší než 50 % zpracovávají tzv. mokré procesy, mezi něž patří také anaerobní fermentace. Produktem anaerobní digesce je bioplyn, který se spaluje v kogeneračních jednotkách. Nejrozšířenějším typem BPS v ČR jsou zemědělské BPS, které fungují na principu mokré fermentace. Tento způsob využívá substrát do obsahu sušiny 12 %. Materiál s vyšším obsahem sušiny umožňuje zpracovávat suchá fermentace, která se využívá při zpracování BRKO v komunální BPS. Oproti mokré fermentaci nevyžaduje žádnou předúpravu vstupních substrátů, ani jejich ředění a ani míchání ve fermentorech. BPS stanice zaznamenali v posledních 10 letech velký rozvoj, který skončil v roce 2013 zastavením podpory obnovitelných zdrojů.

V další části jsem porovnal domácí výrobu elektřiny a tepla z biomasy mezi lety 2014 a 2015. Celková výroba hrubé elektrické energie v tomto roce meziročně klesla o 2,5 % na 83 886,6 GWh. Produkce brutto elektřiny z OZE vzrostla v porovnání s rokem 2014 o 1,7 % na 9 327,2 GWh. Podíl OZE na celkové výrobě hrubé elektřiny stoupl o 0,46 % na 11,12 %. Z biomasy se vyrobilo o 3,87 % více elektřiny brutto než v roce 2014, a to 2 087,8 GWh. 28 % hrubé elektřiny z OZE vyprodukoval bioplyn, z kterého se získalo 2 609,9 GWh, což představuje meziroční nárůst o 1,66 %. V roce 2015 se produkce hrubého tepla z biomasy zvýšila oproti předešlému roku o 2,28 % na 17 800,9 TJ. U bioplynu byl meziroční nárůst 18,15 %. Díky tomu se z bioplynu získalo 5 528,7 TJ.

V energetice se k výrobě tepla a elektřiny z biomasy používají především celulóзовé výluhy piliny, kůra, štěpky a dřevní odpad. V roce 2015 činila produkce hrubého elektřiny z pilin, kůry, štěpky a dřevního odpadu 983,86 GWh, což odpovídá 47,12 % z celkové produkce. Z celulóзовých výluhů se vyrobilo 687,9 GWh, čemuž odpovídá 32,95 % podíl. Největší podíl biomasy na výrobě tepla zaujímaly celulóзовé výluhy s 53,66 %. Získalo se z nich 9 552,4 TJ. Z pilin, kůry, štěpky a dřevního odpadu se vyrobilo 6 486,7 TJ, čemuž odpovídá 36,44 % podílu.

V poslední kapitole jsem uvedl příklady kombinované výroby elektřiny a tepla za použití technologie ORC, RC nebo kogenerační jednotky se zážehovým plynovým motorem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. 296 s. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [2] OCHODEK, Tadeáš. Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy. In: *Biomasa jako zdroj energie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006, s. 5-9. ISBN 80-248-1182-0. Dostupné také z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/sbornik1.pdf>
- [3] KOLONIČNÝ, Jan a Veronika HASE. *Využití rostlinné biomasy v energetice*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2541-0. Dostupné také z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/bioen.pdf>
- [4] WEGER, Jan: Biomasa jako zdroj energie. *Biom.cz* [online]. 2009-02-02 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-jako-zdroj-energie>. ISSN: 1801-2655.
- [5] TRNOBRANSKÝ, Karel. *Řešení centrálních kotelen na biomasu do výkonu 10 MW* [online]. Česká energetická agentura, 2007 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Reseni_centralnich_kotelen_na_biomasu_do_vykonu_10_MW.pdf
- [6] JAKUBES, Jaroslav, Helena BELLINGOVÁ a Michal ŠVÁB. *Moderní využití biomasy: Technologické a logistické možnosti* [online]. Česká energetická agentura, 2006 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/02.pdf>
- [7] MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. Brno: Computer Press, 2011, 106 s. ISBN 978-80-251-2916-6.
- [8] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-865-3406-5.
- [9] BALÁŠ, Marek: Biomasa – princip. *Primaenergie.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-5-21]. Dostupné z: <http://www.primaenergie.cz/alternativni-zdroje-energie/energie-zbiomasy/biomasa-princip.html>
- [10] NÁTR, Lubomír. *Vliv CO₂ na rostliny: Fotosyntéza* [online]. 2007, [cit. 2016-5-11]. Dostupné z: <http://kfrserver.natur.cuni.cz/globe/others-CZ.htm>
- [11] JANDAČKA, J., M. MIKULÍK a M. MALCHO. *Biomasa ako zdroj energie, potenciál, druhy, bilancia a vlastnosti paliv*. Žilina: Juraj Štefuň – GEORG, 2008, 241 s. ISBN 978-80-969161-3-9
- [12] OCHODEK, T., J. KOLONIČNÝ a P. JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy: studie v rámci projektu Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006, 185 s. ISBN 80-248-1207-x.
- [13] Možnosti energetického využití biomasy. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2013, 72 s. ISBN 978-80-7434-122-9 Dostupné také z: http://eagri.cz/public/web/file/283371/Moznosti_energetickeho_vyuziti_biomasy.pdf
- [14] FUKSA, Pavel: Netradiční využití biomasy v praxi. *Biom.cz* [online]. 2009-07-15 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/netradicni-vyuziti-biomasy-v->

[15] CityPLAN. *Příručka pro regionální využití biomasy* [online]. Praha: Česká energetická agentura, 2007 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/dokument/99_8080.pdf

[16] MALÁŤÁK, J., P. VACULÍK. *Biomasa pro výrobu energie*. Praha: ČZU, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

[17] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 287 s. ISBN 80-7300-118-7.

[18] ZÁRYBNICKÁ, Michaela. Biomasa: Obnovitelný zdroj energie. In: *Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni: Katedra energetických strojů a zařízení* [online]. 2015 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/old_web/_files/projekty/enazp/13/IUT/063_Biomasa_-_Obnovitelný_zdroj_energie_-_Zarybnicka_-_P1.pdf 19- <http://www.biomasa-info.cz/cs/biovlastnosti.htm>

[19] Biomasa: Fyzikální vlastnosti biomasy. *Biomasa-info.cz* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/biovlastnosti.htm>

[20] BALÁŠ, Marek a Jiří MOSKALÍK. Měření vlhkosti paliv. In: *Energie z biomasy X*. Brno: VUT v Brně, 2009, ISBN 978-80-214-4027-2. Dostupné z: <http://biom.cz/cz-biodopady-a-kompostovani/odborne-clanky/mereni-vlhkosti-paliv>

[21] OCHECOVÁ, Pavla: *Popel z biomasy – významný zdroj živin*. Biom.cz [online]. 2015-01-19 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/popel-z-biomasy-vyznamny-zdroj-zivin>. ISSN: 1801-2655.

[22] Problematika stanovení charakteristických teplot tavitelnosti popela biomasy. *Chemické listy*. 2013, č. 107, s. 502-509. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2013_06_502-509.pdf

[23] ŠKORPÍK, Jiří: Biomasa jako zdroj energie. *transformacni-technologie.cz* [online]. 2011-08 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/biomasa-jako-zdroj-energie.html>

[24] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Michal BRANC. “Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy”: studie v rámci projektu “Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy”. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007, 228 s. ISBN 978-80-248-1426-1.

[25] Technologie spalování: Fyzikální vlastnosti biomasy. *Biomasa-info.cz* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/techspal.htm>

[26] BALÁŠ, M., M. LISÝ a J. MOSKALÍK. Kotel-2.část. *vytapani.tzb-info.cz* [online] 2012 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>

[27] JAN KOLONIČNÝ, Jiří HORÁK. *Kotle malých výkonů na pevná paliva*. [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2542-7. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.iczt.cz/cs/doc/kotleMV.pdf>

[28] Kovosta-fluid a.s. Fluidní kotle. *kovosta.cz*. [online]. 2013 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z:

<http://www.kovosta.cz/fluidni-kotle.html>

[29] ANDREOVSKÝ Jan. Spalování paliv – Kotle. *ekomonitor.cz* [online]. [cit. 2016-04-18]
Dostupné také z:

http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/obrazky/seminare/ovzdusi/seminar2/10_dil_5b_tisk_andreovsky.pdf

[30] POHOŘELÝ, Michal. Alotermní fluidní zplyňování biomasy [online]. *vscht.cz* 2009
[cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/download.php?id=9>

[31] PEER, Václav a Pavel FRIEDEL. Zplyňování-principy a reaktory. *vytapeni.tzb-info.cz*
2016 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>

[32] POHOŘELÝ, Michael a Michal JEREMIÁŠ. Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění.
Výsledky výzkumu, vývoje a inovací pro obnovitelné zdroje energie. *Biom.cz* [online] 2016
[cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni>

[33] Biomasa-info. Fyzikální vlastnosti biomasy. *Biomasa-info.cz* [online]. [cit. 2016-05-18].
Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/techzpl.htm>

[34] Gbgasified. Zplyňování biomasy. *Gbgasified.com* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné
z: <http://www.gbgasified.com/dokumenty/gbgasified-brochure-cz-2012.pdf>

[35] JELEMENSKÝ, L., L. GAŠPAROVIČ, J. MARKOŠ. Energetické využití rastlinnej
biomasy 2 – Termické procesy. *Biom.cz* [online]. 2013-05-20 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z:
<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-vyuzitie-rastlinnej-biomasy-2-termicke-procesy>. ISSN: 1801-2655.

[36] Biomasa-info. Pyroláza. *Biomasa-info.cz* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z:
<http://www.biomasa-info.cz/cs/techpyr.htm>

[37] MUŽÍK, Oldřich a Antonín SLEJŠKA. Možnosti využití anaerobní fermentace pro
zpracování zbytkové biomasy. *Biom.cz* [online]. 2003-07-14 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z:
<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-vyuziti-anaerobni-fermentace-pro-zpracovani-zbytkove-biomasy>. ISSN: 1801-2655.

[38] bioplyn. Popis: Anaerobní technologie. *bioplyn.cz* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné
z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm

[39] EnviWeb s.r.o. Co je to bioplynka. *Enviweb.cz* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z:
http://www.enviweb.cz/page/co_je_to_bioplynka. ISSN 1803-6686.

[40] CZ Biom. Spolehlivá a ověřená technologie bioplynové stanice. *Biom.cz* [online]. 2002-
12-18 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/spolehliva-a-overena-technologie-bioplynove-stanice>. ISSN: 1801-2655.

[41] BAČÍK, Ondřej. Bioplynové stanice: technologie celonárodního významu. *Biom.cz*
[online]. 2008-01-14 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynove-stanice-technologie-celonarodniho-vyznamu>. ISSN: 1801-2655.

[42] Nalezeno. Bioplynová stanice. *Nalezeno.cz* [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z:
<http://www.nazeleno.cz/bioplynova-stanice.dic>

- [43] ŠKORVAN, Ondřej. Suchou nebo mokrou fermentaci. *Odpady-online.cz* [online]. 2012-02-15 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/suchou-nebo-mokrou-fermentaci/>
- [44] Biolyncs. Popis anaerobní fermentace. *Bioplyncs.cz*. [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: http://bioplyncs.cz/popis_anaerobni_technologie
- [45] FORTEX – AGS, a.s. Bioplynová suchá anaerobní technologie. *Fortexbioplyn.cz*. [online]. [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.fortexbioplyn.cz/cz/sucha-fermentace/>
- [46] KARAFIÁT, Z., T. VÍTĚZ a L., POSPÍŠIL. Bioplynové stanice na „suchou“ fermentaci – šance pro energetické využití biologicky rozložitelných odpadů (BRO). *Biom.cz* [online]. 2009-08-31 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynove-stanice-na-suchou-fermentaci-sance-pro-energeticke-vyuziti-biologicky-rozlozitelnych-odpadu-bro>. ISSN: 1801-2655.
- [47] webové stránky firmy TTS dostupné z: <http://www.tts.cz/cz/boilers/orc.html>
- [48] KUNC, Jan a Libor KOUNC Ondřej. Biomasa – efektivní palivo pro ORC technologii. *tzb-info.cz* [online]. 2005-04-11 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2455-biomasa-efektivni-palivo-pro-orc-technologie>
- [49] CZ Biom. Volba vhodné kogenerační jednotky na bioplyn. *Biom.cz* [online]. 2020-12-18 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/volba-vhodne-kogeneracni-jednotky-na-bioplyn>. ISSN: 1801-2655.
- [50] ŠKORPÍK, Jiří: Tepelné oběhy a jejich realizace. *transformacni-technologie.cz* [online]. 2015-10 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-obehy-a-jejich-realizace.html>
- [51] Energetický regulační úřad. Dokumenty: Měsíční zprávy o provozu. *eru.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/cs/elektrina/statistika-a-sledovani-kvality/ctvrletni-zpravy-o-provozu>
- [52] Energetický regulační úřad. Dokumenty: Roční zprávy o provozu. *eru.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf/3769f65b-3789-4e93-be00-f84416e1ca03
- [53] Energetický regulační úřad. Dokumenty: Podíl bioplynu. *eru.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/463106/BMS_15_12.pdf
- [54] Energetický regulační úřad. Dokumenty: Podíl biomasy. *eru.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-05-21]. https://www.eru.cz/documents/10540/463106/BP_15_12.pdf/
- [55] Ministerstvo průmyslu a obchodu. Dokumenty: Obnovitelné zdroje energie v roce 2014. *eru.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://download.mpo.cz/get/54506/62316/647573/priloha001.pdf>
- [56] MAJLING, Eduard 2015. MPO: v roce 2020 bude podíl OZE na spotřebě energie 16 procent [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/mpo-podil-oze-na-tuzemske-spotrebe-energie-vzroste-do-5-let-na-16/>
- [57] Energetický regulační úřad. Dokumenty: Měsíční zprávy o provozu. *eru.cz* [online]. 2014

[cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/cs/3787provozu>

[58] Plzeňská teplárenská, a.s. Zelená energie. *Pltep.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.pltep.cz/index.php?goto=text&sekce=Ar5bXRIQ&tid=V8TSTGNc&lng=cz>

[59] Invelt s.r.o. Kotle na spalování biomasy typu BF. *invelt.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.invelt.cz/media/soubory/downloads/servis/prospekt_biomasa.pdf

[60] Plzeňská teplárenská, a.s. Schéma nového bloku. *Pltep.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.pltep.cz/upload/File/schema-noveho_bloku.pdf

[61] JELÍNEK, Jiří. Biomasový kotel RKF26 v Teplárně Frýdek-Místek ve Sviadnově. *Allpower.cz* [online]. 2011 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/vystavba_sviadnov.pdf

[62] EnergoFuture, a.s. Kotelna, strojovna. *Energofuture.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.energofuture.cz/bioelektrarna-kt.html>

[62] Calla. Atlas zařízení využívajících obnovitelné zdroje energie. Vytápění biomasou: Trhové Sviny - Tepelné hospodářství města. *calla.ecn.cz* [online]. 2008 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://calla.ecn.cz/atlas/detail.php?id=268>

[63] KUNC, Jan. ORC technologie v realizaci (II) - Trhové Sviny, srovnání. *tzb-info.cz* [online]. 2005 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2834-orc-technologie-v-realizaci-ii-trhove-sviny-srovnani>. ISSN 1801-4399.

[64] MAURING spol. s r.o. Referenční stavby. *Mauring.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.mauring.cz/ref-inzenyrske-stavby/>

[66] TTS group. Termoolejový kotel. *tts.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.tts.cz/cz/boilers/downld/4.pdf>

[67] KUNC, Jan. 2005. *ORC technologie v realizaci (I) – Lieny, Třebíč*. [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/2537-orc-technologie-v-realizaci-i-lienz-trebic>

[68] TTS group. Teplárna SEVER. *tts.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.tts.cz/cz/energo/zdroje-tepla-teplarna-sever.html>

[69] TTS group. Teplárna Sever- kotel Vesko-S 5,0MW. *tts.cz* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.tts.cz/de/boilers/reference-trebic-trebic-teplarna-sever---kotel-vesko-s-5,0-mw-c8.html>

[70] Seven. Energetická efektivnost bioplynových stanic. *svn.cz* [online]. Praha: Seven Energy, 20011 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.svn.cz/assets/files/informacni-materialy/2013/Publikace-energeticka-efektivnost-BPS-kompletni.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol/Zkratka	Jednotka	Veličina
Q_s	MJ.kg^{-1}	Spalné teplo
Q_i	MJ.kg^{-1}	Výhřevnost
w_{dr}	%	Dřevařská (absolutní) vlhkost
w	%	Energetická (relativní) vlhkost
BP		Bioplyn
BPS		Bioplynová stanice
RC		Rankin-Clausiův cyklus
ORC		Organický Rankinův cyklus
OZE		Obnovitelné zdroje energie
CZT		Centrální zásobování teplem
TG		Turbína